

# ライフラインの地震被害早期把握のためのハイブリッドモニタリングシステムの構築

著者	宮島 昌克
著者別表示	Miyajima Masakatsu
雑誌名	平成9(1997)年度 科学研究費補助金 基盤研究(C) 研究成果報告書
巻	1996-1997
ページ	86p.
発行年	1998-03
URL	<a href="http://doi.org/10.24517/00049465">http://doi.org/10.24517/00049465</a>



ライフラインの地震被害早期把握のための  
ハイブリッドモニタリングシステムの構築

Development of Hybrid Monitoring System  
for Early Detection of Earthquake Damage to Lifeline

課題番号：08650545

平成 8 年度～平成 9 年度科学研究費補助金（基盤研究（C））  
研究成果報告書

Grant-in-Aid for Scientific Research (C)

平成 1 0 年 3 月  
March 1998

研究代表者 宮島 昌克  
（金沢大学大学院自然科学研究科）

Masakatsu MIYAJIMA  
(Kanazawa University)

文部省科学研究費助成金（基盤研究（c））研究成果報告書

Grant-in-Aid for Scientific Research (C)

研究課題：ライフラインの地震被害早期把握のためのハイブリッドモニタリング  
システムの構築

課題番号：08650545

研究組織：研究代表者：宮島昌克（金沢大学大学院自然科学研究科 助教授）

研究分担者：北浦 勝（金沢大学工学部 教授）

研究分担者：高山純一（金沢大学工学部 助教授）

研究分担者：村田 晶（金沢大学工学部 助手）

研究分担者：吉田雅穂（福井工業高等専門学校 講師）

研究協力者：池本敏和（金沢大学工学部 助手）

研究経費：平成8年度 1, 300千円

平成9年度 800千円

計 2, 100千円

研究発表：

（1）学会誌等

- 1) Masaho YOSHIDA, Masakatsu MIYAJIMA and Masaru KITAURA: Evaluation of Liquefied Ground Flow Based on Estimation of Spatial Liquefaction Potential, Proc. of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, No.1051, 1996.6.
- 2) 高山純一：地震時道路網の連結信頼性からみた消防力低下地域の予測、第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集、pp.173～17、1996.
- 3) Masakatsu MIYAJIMA and Masaru KITAURA: Performance of Water Supply Pipelines During the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Proc. of 5th US/Japan Workshop on Urban Earthquake Hazard Reduction, pp.377-380, 1997.
- 4) 村田 晶・宮島昌克・北浦 勝：1995年兵庫県南部地震における地盤特性を考慮した上水道管路の被害要因分析，土木学会・第2回阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.157-162, 1997.
- 5) Masaho YOSHIDA, Masakatsu MIYAJIMA and Masaru KITAURA: A Simplified Procedure to Estimate Liquefaction-Induced Large Ground Displacement using

Spatial Liquefaction Potential, Proc. of the Seventh International Conference on Structural Safety and Reliability, 1997.11.

- 6) 高山純一・飯坂貴宏：金沢市を対象とした大震時における消防力低下地域の予測と消防水利計画に関する研究，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp.403～406，1997.
- 7) Endi ZHAI, Masakatsu MIYAJIMA and Masaru KITAURA: Nonlinear Amplifications of Vertical Ground Motions in the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake, Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, No.582, pp.1-10, 1997.
- 8) 村田 晶・宮島昌克・北浦 勝：1994年三陸はるか沖地震における上水道管路被害の要因分析，三陸はるか沖地震シンポジウム論文集，pp. 109-116，1998.

## (2) 口頭発表

- 1) 吉田雅穂・宮島昌克・北浦 勝・深谷正俊・古田竜一：新潟地震時の液状化による側方流動の再検討，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集，第3部(A)，pp.254-255，1996.
- 2) 宮島昌克・北浦 勝・安達 實・吉田雅穂・福島聡一郎・北浦直子：液状化領域把握のための地盤情報データベース構築に関する検討，土木学会中部支部平成8年度研究発表会講演概要集，pp.403-404，1997.
- 3) 宮島昌克・北浦 勝・安達 實・野津 智：強震記録を用いた液状化検知方法に関する研究，土木学会中部支部平成8年度研究発表会，pp. 417-418，1997.
- 4) 高山純一・飯坂貴宏：大震時における水利・道路網からみた消防力低下地域の予測に関する研究，土木学会中部支部平成8年度研究発表会講演概要集，pp.619～620，1997.
- 5) 吉田雅穂・宮島昌克・北浦 勝：液状化領域の空間分布異方性に関する研究，土木学会中部支部平成8年度研究発表会講演概要集，pp.405-406，1997.
- 6) 福島聡一郎・宮島昌克・安達 實・北浦 勝・吉田雅穂・北浦直子：液状化による永久変位予測のための液状化領域の推定，土木学会中部支部平成8年度研究発表会講演概要集，pp.401-402，1997.
- 7) 宮島昌克・野津 智・北浦 勝：強震記録を用いた液状化検知方法に関する検討，第24回地震工学研究発表会講演概要，pp.265-268，1997.
- 8) 福島聡一郎・宮島昌克・吉田雅穂・北浦 勝：液状化領域を考慮した永久変位量の簡易予測に関する研究，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.537-540，1997.
- 9) 宮島昌克・野津 智・北浦 勝：強震記録の上下動/水平動比を用いた液状化判定法に関する一考察，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，第1部(B)，pp. 526-527，1997.
- 10) 吉田雅穂・宮島昌克・北浦 勝：液状化地盤の側方流動方向に関する検討，

- 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，第3部(A)，pp.256-257，1997.
- 11) 高山純一・飯坂貴宏：都市直下型大地震を想定した水利・道路網からみた消防力低下地域の評価，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，第4部，pp.550～551，1997.
  - 12) 宮島昌克・野津 智・北浦 勝：リアルタイム地震防災のための強震記録を用いた液状化検知法，第16回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，pp.83-84，1997.
  - 13) 高山純一・飯坂貴宏：大震時同時多発型火災を想定した消防力低下地域の評価と消防水利計画に関する研究 — 金沢市を事例に —，土木計画学研究・講演集，No.20，pp.475～478，1997.
  - 14) 宮島昌克・野津 智・井口典明・北浦 勝・安達 實：強震記録を用いた液状化センサーの開発に関する基礎的研究，土木学会中部支部平成9年度研究発表会講演概要集，pp.455-456，1998.
  - 15) 宮島昌克・菊川雅司・北浦 勝・安達 實：リアルタイム地震防災のための上水道管路網の最適モニタリング，土木学会中部支部平成9年度研究発表会講演概要集，pp.89-90，1998.
  - 16) 吉田雅穂・宮島昌克・北浦 勝：液状化による側方流動の方向性に関する検討，土木学会中部支部平成9年度研究発表会講演概要集，pp.467-468，1998.
  - 17) 生田目尚美・宮島昌克・北浦 勝・津田喜裕：上水道管路網の被害予測に関する研究，pp.103-104，土木学会中部支部平成9年度研究発表会講演概要集，1998.

# ライフラインの地震被害早期把握のための ハイブリッドモニタリングシステムの構築

## 目 次

第1章 緒 論	1
1-1 研究の目的	1
1-2 研究の構成	2
第2章 地震動のモニタリングによる液状化判定	3
2-1 概 説	3
2-2 振幅特性に注目した液状化検知	3
2-3 振動数特性に注目した液状化検知	5
2-4 液状化判定指標の提案	8
2-5 結 語	12
第3章 液状化領域の空間分布推定	34
3-1 概 説	34
3-2 解析手法	34
3-3 推定精度に関する検討	36
3-4 1995年兵庫県南部地震におけるケーススタディ	37
3-5 結 語	38
第4章 上水道ネットワークの最適モニタリング位置	48
4-1 概 説	48
4-2 上水道ネットワークのモニタリング重要度評価法	48
4-3 金沢市におけるケーススタディ	53
4-4 結 語	59
第5章 結 論	85
附属資料	

## 第1章 緒 論

### 1-1 研究の目的

1995年兵庫県南部地震においては、都市供給系のライフライン施設にも甚大な被害が発生し、発震直後の復旧、救援活動に大きな影響を及ぼすとともに、長期にわたり市民生活に暗い影を落とした。もちろん、ライフライン施設、特に供給管路網が壊滅的な被害を受けたことが、被災後に大きな混乱をもたらした原因のひとつであるが、被災直後に被害を早期に把握できなかったことが、ガスの供給停止の遅れや戦略的消火活動の不能を招いたものと考えられる。これらのことを教訓として、地震発生直後から時系列的に地震災害に直接対応していこうとする、いわゆるリアルタイム地震防災に対する期待が高まっている。兵庫県南部地震の発生以前から、関西地震観測研究協議会などでは強震観測網を整備し、地震直後に地震情報を早期に伝達するためのネットワークを整備し始めていた。また、科学技術庁のKyoshin Netをはじめとして各地方自治体などでは、阪神・淡路大震災以降に大規模に整備されてきている。しかし、全国に設置されたこれらの数多くの強震計が計測震度を知らせるだけでは十分でないことは明かである。すなわち、リアルタイム地震被害把握のためには、震源位置や震度などの情報だけではなく、地盤破壊などの状況をも検知し、それらの情報を地震直後に収集するとともに、観測点のデータをもとに、面的な地盤被害および構造物破壊の状況を予測することが重要である。

そこで本研究では、ライフラインの地震被害に支配的な要因の一つである地盤の液状化に注目し、リアルタイム地震被害把握のための液状化センサーを開発するとともに、その結果を利用したライフライン地震被害の即時推定法の構築を目的とする。すなわち、地震時の地盤挙動とライフライン施設の地震被害との関連を明らかにし、地盤のモニタリングとライフライン施設のモニタリングを連動させることにより、精度の高い地震被害早期把握システムを構築することを目的とする。

本研究では、まず兵庫県南部地震をはじめとする過去の被害地震におけるライフラインの震害資料を収集、整理、分析し、ライフライン被害に関与する要因の分析を行う。また、過去の地震被害記録によれば、地盤の液状化がライフラインに壊滅的な被害を与えていることから、液状化領域の即時予測法を開発する。すなわち、強震記録を用いた液状化検知法の開発を試みるとともに、観測点における液状化発生の有無を予測するだけではなく、観測点以外の液状化領域を即時に推定する手法を提案する。さらに、これらの予測結果とライフライン施設のモニタリング結果を連動させることにより、精度の高いライフラインの即時被害予測システムの構築を試みる。

## 1-2 研究の構成

本研究報告書は5章から構成されている。

第1章は緒論である。

第2章では、ライフラインの地震被害に大きな影響を与えている地盤の液状化を取り上げ、地震動のモニタリングによる液状化判定手法について検討した。全国各地で広範に展開されている強震観測記録を用いた液状化センサーの開発を目的とし、強震記録における振幅特性と振動数特性のそれぞれに注目して液状化判定指標を提案した。

第3章では、液状化領域の空間分布推定に関する検討を行った。ライフラインの即時被害予測や復旧戦略の策定にあたっては、液状化領域の平面分布を知ることが重要であるが、液状化センサーを無数に配置することは不可能であるので、限られた情報から液状化領域の空間分布を推定する方法を提案した。

第4章では、ライフラインの最適モニタリング位置決定に関して検討を行った。地震時流量解析から管路網のクリティカルポイントを明らかにするとともに、防災拠点などを考慮した管路網の重要度を定義し、それらを用いた最適モニタリング位置の決定方法を提案した。さらに、金沢市における上水道管路網を対象にケーススタディを行った。

第5章は結論であり、本研究の成果と今後の課題を整理してまとめた。

また、附属資料として、本文に十分に収めることの出来なかった研究成果も含めて、本研究課題に対して各研究分担者がこれまでに発表した論文の別刷りを掲載している。



## 第2章 地震動のモニタリングによる液状化判定

### 2-1 概 説

ライフラインの地震被害には地盤変状、特に液状化の影響が大きく寄与していることが知られている。従来より地震動の強震観測は各地で行われており、阪神・淡路大震災以降さらに大規模に整備されてきているが、地盤変状を直接モニタリングしている例は限られている。そこで本章では、強震記録をもとに観測点における液状化の発生の有無を判定する手法の開発について検討する。

地盤の液状化の検知といっても、発生範囲には平面的広がりほかに液状化層の厚さという3次元的な広がりがあり、液状化の程度や継続時間といった要因も考えなければならない。本研究では第1段階として、地表面付近に置かれた強震計で捉えられる、液状化地盤特有の地盤震動特性を定量的に判定することを目的とする。すなわち、本研究では特に以下の2点に注目した。

- (1) 液状化地盤においては、地盤応答加速度の水平成分は減少するが、上下成分は減衰せず、むしろ増幅する。したがって、上下方向と水平方向の地盤応答加速度の比、上下/水平比は液状化地盤では大きくなるという振幅特性。
- (2) 液状化が発生すると地盤が軟化するので、地表面における加速度波形は長周期化する。すなわち、強震記録の卓越振動数が低下するといった、液状化地盤の振動数特性。

本章では、液状化が発生した地点における強震記録として、1995年兵庫県南部地震の際のポートアイランド、六甲アイランドの2点、1993年釧路沖地震の際の釧路港湾建設事務所、1987年Superstition Hills地震のWildlife、1968年十勝沖地震の際の青森港湾建設事務所、1964年新潟地震の際の川岸町県営アパート、を用いる。また、非液状化地盤としては、1995年兵庫県南部地震の際の尼崎、堺、JR鷹取駅、千早赤阪の4地点と1993年北海道南西沖地震の際の室蘭港、1993年茨城県南西部地震の奥村組筑波研究所、それに1997年3月鹿児島県西部地震の阿久根、川内の合計8点の強震記録を用いる。なお、これらの記録はいずれも地盤で観測されたものである。

### 2-2 振幅特性に注目した液状化検知

地震時の地盤の揺れは一般に地表面に近づくにつれて増幅する。しかしながら、液状化地盤では地盤が液体のようになるため、水平方向の揺れはせん断波の減少とともに地表面に近づくにつれ小さくなる。それに比べ上下方向の揺れは、比較的その影響を受けにくい。そのため、上下方向の応答加速度と水平方向の応答加速度の比（上下方向応答加速度/水平方向応答加速度）をとれば、液状化地盤ではその比が大きくなると予想される。このような観点から、本章ではこの比を「上下/水平比」と呼び、液状化地盤の検知に用いることを検討する。

解析方法としてはまず、水平方向の強震記録は一般に2方向（方位差90度）の記録があるので、その2方向の強震記録のベクトル和を時刻毎にとり、それを水平方向の応答加速度記録とする。つぎに、上下、水平方向のどちらも0.2秒間隔に強震記録を区切り、その0.2秒間の中での最大値をその時間の代表値とし、上下方向、水平方向のそれぞれの代表値を用いて、0.2秒区切りで「上下方向の地盤応答加速度／水平方向の地盤応答加速度」を求め、それを「上下／水平比」とした。なお、強震記録の0.2秒間隔で最大値を求めている理由は、以下の通りである。もし水平方向の地盤応答加速度が0、もしくは0に近い値ならば、上下／水平比の分母が限りなく小さくなる。そのため、上下／水平比が液状化とは関係なく大きくなってしまいうためである。また、地震の種類や地盤状況にもよるが、一般に強震記録の初期段階では上下方向の地震動が大きくなる傾向がある。すなわち、地盤の液状化の有無に関わらず上下／水平比が大きくなる。そこで、本研究では水平方向の最大加速度が記録された時刻以降の上下／水平比のみに注目する。

図2-1～2-5に、液状化が発生したという報告がある各観測地点の上下／水平比のグラフを示す。なお、1964年新潟地震の際の川岸町県営アパートの強震記録については、上下方向の強震記録がないために、ここでの解析を行っていない。同図における点線矢印は、上述した水平方向の最大加速度が記録された時刻を示している。したがって、この点線矢印の右側のみに注目して以下の考察を進める。

まず、1995年兵庫県南部地震の際のポートアイランドと六甲アイランドの上下／水平比を比べる。この2地点は、どちらも埋め立てによって造られた人工島であり、兵庫県南部地震の際には液状化の発生が報告されている。しかしながら、図2-1のポートアイランドの上下／水平比を図2-2の六甲アイランドの上下／水平比とを比べると、ポートアイランドの上下／水平比は全体的に大きな値を示していて、最大値も9.6と非常に大きな値を示しているのに対し、六甲アイランドでは大きな値を示しているが突発的であり、最大値も5.4とポートアイランドの半分程度の値となっている。これは、ポートアイランドでは全島にわたって広範囲な液状化が見られるのに対し、六甲アイランドでは液状化対策がなされており、ポートアイランドに比べると噴砂の量が少なく<sup>1)</sup>、液状化の範囲も限定されていたためと考えられる。図2-3に示す釧路港湾建設事務所の上下／水平比を見ると、ここでも上下／水平比は増加している。しかし、図2-1、2-2に示すポートアイランドや六甲アイランドなどと比べると、その値は小さな値となっている。報告書<sup>2)</sup>によれば、「ある程度の地盤の軟化は起こっているものの液状化には至ってはいないと考えられる」とあり、上下／水平比の大きさは液状化の程度と相関があるとも考えられる。

つぎに、図2-4、図2-5について、地震の種類の違いから考察する。1995年兵庫県南部地震が直下型の地震であるのに対し、1968年十勝沖地震は海洋型の地震である。そのため、海洋型の地震における地表面の上下震動は、直下型の地震のそれと比べると小さくなると考えられる。しかしながら、図2-5に示す青森港の上下／水平比は比較的大きな値を示している。このことより、地震の種類の違いには関係なく上下／水平比は地盤の液状化に反応しているものと考えられる。また、同じ直下型地震であっても、Superstition Hills地震は兵庫県南部地震と比べると主要動継続時間が2倍近く長い。このような地震であっても、

地盤が液状化すれば図2-4に示すように上下／水平比は大きな値を示す。以上の解析結果により、どのような地震であっても、強震記録観測地点の地盤が液状化しているのであれば上下／水平比は大きな値を示すと考えられ、上下／水平比が液状化の検知のための有効な指標の1つであると考えられる。

そこで、非液状化地盤の強震記録についても検討した。図2-6～2-13に非液状化地盤における強震記録の上下／水平比を示す。これらを見ると、液状化地盤の上下／水平比と比べると全体的に小さな値となっていることがわかる。この傾向はこれら以外の様々な地震における強震記録の解析結果からも確認された。しかしながら、詳細に見ると図2-6、図2-7に示すJR鷹取駅と尼崎では上下／水平比が突発的ではあるが比較的大きな値を示している。これらの2地点については、どちらも観測地点付近に噴砂跡などがあることが報告されており<sup>3) 4)</sup>、非液状化地盤であると言い切れないのが現状である。すなわち、液状化していなくとも地盤の軟化現象が起きた可能性も考えられ、そのため、上下／水平比が比較的大きな値を示したのではないかと考えられる。

そこで問題となるのが、上下／水平比は地盤の液状化のみによって大きくなるものではなく、軟弱な地盤に対しても大きくなるのではないかということである。その点については、図2-10と図2-11に示す阿久根と川内の上下／水平比を用いて考える。これら2地点の地盤は図2-14と図2-15に示すように  $N$  値が小さく非常に軟弱な地盤である<sup>5)</sup>。しかし、同一市内で液状化発生の報告はあるものの観測地点付近では噴砂などは見られていない<sup>6)</sup>。解析結果を見ると上下／水平比は矢印より左側では多少大きくなっているものの、本解析で問題となる矢印より右側、すなわち水平方向の加速度が最大値を記録した以降では非常に小さな値を示している。このことより、上下／水平比は軟弱な地盤には反応せず、地盤の液状化に反応し、その値が大きくなるものと考えられる。

## 2-3 振動数特性に注目した液状化検知

### 2-3-1 フーリエスペクトルによる解析

図2-16～2-21に液状化地点における強震記録のフーリエスペクトルを示す。これらによれば、全ての観測地点の卓越振動数が1.0Hz以下になっていることと、高振動数になるほどフーリエスペクトルが小さくなっていることがわかる。すなわち、液状化が発生することにより、高振動数成分が減衰し、低振動数成分のみ増幅することを示している。

それぞれの図を比べると、液状化の被害が顕著だった兵庫県南部地震の際のポートアイランド、六甲アイランド、新潟地震の際の川岸町県営アパート、Superstition Hills地震のWildlife、十勝沖地震の青森港でのフーリエスペクトルのグラフの形は非常によく似ている。しかし、図2-18に示す釧路沖地震の釧路港湾建設事務所では、卓越振動数は1.0Hz以下の低振動数になっているものの、他の観測地点と比べると高振動数成分も大きな値を示している。これは、釧路港においては全体的には大規模な液状化が発生したものの、釧路港湾建設事務所の強震記録観測地点付近では噴砂が見られず、観測地点のある表層地盤の

N値も15以上と大きな値を示していることから、地盤の軟化は起こったが液状化までは至っていないことと対応していると考えられる。

非液状化地盤についても同様の検討を行った。図2-22～2-29に各観測地点における強震記録のフーリエスペクトルを示す。これらを見ると、JR鷹取駅、尼崎、阿久根、川内の4地点のものが他の記録と比べると卓越振動数が低いことがわかる。これら以外の観測地点については、フーリエスペクトルの大きさは違うものの卓越振動数は2Hz以上であり、液状化地盤と比べると高振動数となっている。卓越振動数が低い強震記録のうち、JR鷹取駅、尼崎については前述したように、付近に噴砂跡などがあることから非液状化地盤とは断定できず、地盤の軟化現象が発生したとも考えられ、そのために卓越振動数が低くなっているものと思われる。阿久根と川内については、図2-14、2-15に示したように、最初から軟弱な地盤であったために卓越振動数が低くなっていると考えられる。また、この2地点では同一市内で起きた液状化の影響が反映されている可能性も考えられる。

このように、フーリエスペクトルを用いた解析では軟弱な地盤と液状化の発生が明確に判別できない場合も十分に考えられる。

### 2-3-2 ランニングスペクトルによる解析

図2-30～2-35に液状化地点における強震記録のランニングスペクトルを示す。ここでは、各記録の最大フーリエスペクトル値でランニングスペクトルを基準化している。これらを見ると、全時間を通じて低振動数成分が高振動数成分よりも大きくなっていることがわかる。これは、前述したように液状化地盤で低振動数成分のみ増幅し、地表面では加速度波形が長周期化することに対応している。また、時間が経つにつれて高振動数成分が小さくなり、フーリエスペクトルが最大値を示した後は、ほとんど3.0Hz以上の成分は記録されていない。このような経時変化は、フーリエスペクトルからは読みとれない特徴であり、液状化過程における地盤動特性の変化を表しているものである。

兵庫県南部地震の際のポートアイランド、六甲アイランド、それに新潟地震の際の川岸町県営アパートのランニングスペクトルは、最初から低振動数成分に偏っている。これは、観測地点のボーリング調査の結果より、地盤そのものが最初から軟弱であったことによると考えられる。これに対し、釧路沖地震の釧路港とSuperstition Hills地震のWildlifeのランニングスペクトルでは高振動数成分が大きいように思われる。また、Wildlifeでは基準化されたフーリスpekトルが1.0を記録された時点では、高振動数成分はほとんどなくなっているのに対し、釧路港ではそれ以降でもまだ高振動数成分がはっきりしている。これは、前述したように、釧路港の強震記録観測地点付近では液状化まで至らず、地盤の軟化程度で収まっていることを表していると思われる。

非液状化地盤についても同様の検討を行った。図2-36～2-43に各観測地点における強震記録のランニングスペクトルを示す。このうち、図2-36と2-37に示す兵庫県南部地震の際のJR鷹取駅と尼崎のランニングスペクトルでは、比較的低振動数領域に偏っており、時間が経つにつれて高振動数成分が小さくなっている。これは、液状化地盤によく見られる傾向であり、前述したように観測地点付近の地盤が軟化した可能性が考えられる。

また、図2-40、2-41に示す鹿児島県北西部地震の際の阿久根と川内の強震記録のランニングスペクトルが、3.0Hz以下で最大を示し、高振動数成分が小さくなっている。この傾向は阿久根の方が顕著に表れており、液状化地盤でのランニングスペクトルと非常に似た解析結果になっている。しかしながら、阿久根の地盤は粘土層がそのほとんどを占めており、液状化の発生する可能性は非常に小さい。このことより、阿久根や川内では観測地点で液状化が発生したのではなく、地盤が非常に軟弱であるためにランニングスペクトルが低振動数領域に偏ったものと考えられる。

その他の観測地点では、ランニングスペクトルが全体的に大きな値を示しており、最大値を記録した振動数も液状化地盤のものと比べると高い振動数となっている。この傾向は、直下型地震の強震記録でも海洋型地震のそれでも共通しており、液状化地盤と非液状化地盤を分ける有力な判断材料となると考えられる。しかしながら、軟弱な地盤の解析結果と液状化地盤のそれが非常に似ているので、その判別に工夫が必要である。

### 2-3-3 卓越振動数の時間変化による解析

図2-44～2-49に液状化地点における強震記録の卓越振動数の時間変化を示す。これらは、5秒毎の記録からフーリエスペクトルを求め、それぞれの卓越振動数を求めたものである。これらを見ると、最初は高振動数だった卓越振動数が途中から急激に変化し、非常に低振動数になっていることがわかる。これは、液状化の発生により地盤の振動数特性が急激に変化して、低振動数成分が卓越することを表している。

川岸町県営アパートのグラフを除いては、地震動の大きさや液状化の程度が違う割にはよく似た変化を示している。すなわち、地震動の最初は高振動数であった卓越振動数が途中から急激に低下し、3.0Hz以下になっている。しかし、川岸町県営アパートの卓越振動数は最初から3.0Hz以下の低振動数であり、時間が経っても余り変化が見られない。この原因の1つに地盤動特性の違いが考えられる。川岸町県営アパートの地盤は20mまではほぼ均等な砂が堆積しており、非常に液状化が起こりやすい地盤であるので、地震動が始まってすぐに地盤が軟化したために最初から強震記録が長周期化し、卓越振動数も地震動の初期段階から低振動数であったものと考えられる。

非液状化地盤については以下のものであった。図2-50～2-57に各観測地点の卓越振動数の時間変化を示す。これらを見ると、兵庫県南部地震の際の千早赤阪、堺の2地点と、北海道南西沖地震の室蘭港、茨城県南西部地震の奥村組筑波研究所の卓越振動数は比較的高振動数である部分が長く続いており、少なくとも強震記録の半分以上の時間で2Hz以上の値を示している。それらと比べると、兵庫県南部地震のJR鷹取駅、尼崎、それに、鹿児島県北西地震の阿久根、川内は、平均して2Hz以下と低い振動数であり、強震記録の全時間を通して余り変化が見られない。JR鷹取駅と尼崎では強震記録の観測地点付近で地盤の軟化現象が起こっている可能性があり、その影響により強震記録が長周期化し、卓越振動数も低い振動数となったと考えられる。また、阿久根と川内では観測地点の地盤は非常に軟弱であり、そのため、卓越振動数が低振動数になったものと考えられる。しかしながら、これらの長周期化した強震記録の解析結果と液状化地盤の卓越振動数の時間変化とは違っ

た傾向を示している。すなわち、観測地点で液状化が発生した場合は、液状化が発生する以前は卓越振動数が高振動数となっているが、液状化が発生した直後に振動数特性が変化し、卓越振動数が急激に低振動数になる。そのために卓越振動数の時間変化を表すグラフでは、高振動数であった卓越振動数が急な傾きを描いて低振動数になっている。一方、観測地点付近の地盤の軟化現象による影響や、観測地点の地盤が軟弱であったために強震記録が長周期化した場合には、液状化地盤で見られたような振動数特性の急激な変化は見られず、最初から卓越振動数は低振動数であり変化はほとんど見られない。これらの傾向の違いにより液状化地盤と非液状化地盤の違いが判別できるものと考えられる。

## 2-4 液状化判定指標の提案

### 2-4-1 上下／水平比による解析結果の数量化

これまでの解析結果より、液状化地盤では水平加速度が最大値を示した時刻以降の上下／水平比が大きくなることが明かとなった。そこで、液状化地盤を検知するための指標として、上下／水平比の最大値を用いることにし、それを「最大上下／水平比」と呼ぶ。この際にも、地震動の初期段階は液状化の有無に関わらず上下成分が大きくなることが分かっているため、水平加速度が最大値を示した時刻以降の最大値を用いることにする。

図2-58に代表的な観測地点での最大上下／水平比を示す。これらの地点における液状化の発生に関する報告をまとめると表2-1のようである。これを見ると、液状化地盤の最大上下／水平比が非液状化地盤の値よりも大きな値を示していることがわかる。そこで、他の観測地点での最大上下／水平比も比べたところ、海洋型地震の値が直下型地震の値に比べると小さな値を示すものの、液状化が起こった、もしくは付近に噴砂跡などがあり地盤が液状化ないしは軟化した可能性のある地盤では、最大上下／水平比が2.0以上になっていることが明かとなった。

以上より、最大上下／水平比が2.0未満の場合には地盤が液状化している可能性は低く、2.0以上の場合には液状化した可能性が高いと考えられる。

### 2-4-2 フーリエスペクトルによる解析結果の数量化

これまでの解析結果より、液状化地盤では加速度波形が長周期化するために、液状化地盤のフーリエスペクトルは、非液状化地盤のそれと比べると低振動数成分が卓越していることがわかった。

そこで本研究では、フーリエスペクトル全体の面積と低振動数成分の面積との比をとることによって、液状化地盤と非液状化地盤の違いを定量的に捉えることを試みる。すなわち、「フーリエスペクトルの低振動数成分の面積／フーリエスペクトル全体の面積」を「フーリエスペクトル面積比」とした。もし地盤が液状化して、加速度波形が長周期化したならば、フーリエスペクトルの低振動数成分が卓越し、フーリエスペクトル面積比が大きくなると予想される。

そのためにはまず、本研究における低振動数成分とは何Hzまでを指すのかを定義する必要がある。そこで、液状化地盤と非液状化地盤の代表的な地点を選び、低振動数成分の境界となる振動数を変化させてフーリスpekトル面積比を求めた。その結果を図2-59に示す。同図によれば、非液状化地盤の観測地点のフーリスpekトル面積比（図中、点線）は直線的に変化しているが、液状化地盤の観測地点のフーリエスペクトル面積比（図中、実線）は1Hzあたりから急激なカーブを描いて大きくなっている。同図より、液状化地盤と非液状化地盤のフーリエスペクトル面積比の差が大きい2.0Hzを境界とし、2.0Hz以下を低振動数成分とし、「フーリエスペクトルで2.0Hz以下の部分の面積／フーリエスペクトルの全体面積」を「フーリエスペクトル面積比」として、以下の解析を進める。

つぎに、図2-60に代表的な観測地点におけるフーリエスペクトル面積比を示す。同図によれば、液状化が起こった観測地点のフーリエスペクトル面積比が、他のものと比べると大きな値を示していることがわかる。そこで、この他の観測地点のフーリエスペクトル面積比も求めたところ、液状化地盤、もしくは付近に噴砂跡などがあり、地盤が液状化したか軟化したと考えられる地盤のフーリエスペクトル面積比は0.25以上を示しており、非液状化地盤では0.25未満の値となった。

以上より、観測された強震記録のフーリエスペクトル面積比が0.25以上の場合には、その地盤が液状化している可能性が高く、0.25未満の場合には液状化している可能性は低いと考えられる。

しかしながら、この方法では、液状化地盤による加速度波形の長周期化と、後揺れ波や表面波による影響による長周期化、または、最初から地盤が軟弱であるために長周期成分が卓越している場合との判別が明確には出来ない。この点については後に改めて検討することにする。

#### 2-4-3 ランニングスペクトルによる解析結果の数量化

これまでのランニングスペクトルによる解析より、液状化地盤のランニングスペクトルは低振動数成分に偏っていることがわかった。ここでは、液状化地盤と非液状化地盤のランニングスペクトルの特徴の違いを定量的に表すことを試みる。そこで、フーリエスペクトルを用いた解析と同様に、ランニングスペクトル全体の体積と低振動数成分の体積の比に注目して検討する。

フーリエスペクトルを用いた解析と同様の考え方で、「ランニングスペクトルの低振動数成分の体積／ランニングスペクトル全体の体積」を「ランニングスペクトル体積比」とする。そして、本解析における低振動数成分とは何Hzまでの領域かを定める必要がある。ので、液状化地盤と非液状化地盤の代表的な観測地点を選び、それぞれ低振動数成分の境界となる振動数を変化させてランニングスペクトル体積比の変化を調べた。その結果を示したのが図2-61である。同図は、フーリエスペクトルについて同様の検討を行った図2-59と似ており、2.0Hzで液状化地盤と非液状化地盤のランニングスペクトル体積比が最も隔たりのあることがわかる。そこで、「ランニングスペクトルにおける2.0Hz以下の低振動数領域の体積／ランニングスペクトル全体の体積」を「ランニングスペクトル体積比」とする。

各観測地点でのランニングスペクトル体積比を図2-62に示す。同図によれば、液状化地盤、または付近に噴砂などがあつた地盤のランニングスペクトル体積比が非液状化地盤のそれよりも大きな値を示しているのがわかる。そこで、他の観測地点のランニングスペクトル体積比も求めたところ、非液状化地盤のそれは0.35未満であることがわかった。このことより、ランニングスペクトル体積比が0.35未満の場合、その地盤は液状化している可能性は低く、0.35以上の場合には液状化している可能性があると言える。しかし、この方法ではフーリエスペクトルを用いた場合と同様に、液状化地盤と、軟弱地盤や後揺れ波、表面波の影響がある場合との判別が明確に出来ない可能性がある。

#### 2-4-4 卓越振動数の時間変化による解析結果の数量化

これまでの解析により、卓越振動数の時間変化を表したグラフは地盤の振動数特性の変化をよく表し、液状化判定に有効であることが明かとなった。ここでは、卓越振動数の時間変化のグラフから、液状化地盤と非液状化地盤の特徴の違いを定量的に表すことを試みる。

まず、兵庫県南部地震における液状化地盤での例として、ポートアイランドと六甲アイランドの卓越振動数の時間変化を図2-63に、非液状化地盤の例として阿倍野、忠岡のグラフを図2-64に、そして、液状化が起こったかどうかははっきりしないが付近に噴砂跡などがあつた地盤の例として尼崎、JR鷹取駅のグラフを図2-65に示す。それぞれのグラフの特徴を挙げると以下のようなものである。図2-63では、最初は高振動数であつた卓越振動数が途中から急激に変化し、低振動数になっている。図2-64では高振動数の時間が長く、徐々に低振動数になっている。図2-65では最初から低振動のままであまり際だつた変化は見られない。卓越振動数の急激な変化に注目して、卓越振動数の時間変化の負の傾きを算出し、その絶対値の最大値を「卓越振動数時間変化率」とした。6地点における卓越振動数時間変化率を表2-2に示す。しかし、これだけでからでは液状化、非液状化を判別できないようである。

そこで、別の指標として「平均卓越振動数」を考えた。これは2.5秒ごとに前後5秒間の卓越振動数を算出し、これらの平均値を求めたものである。これによって非液状化地盤の阿倍野、忠岡を他と区別できるものと考えられる。表2-3に6地点の平均卓越振動数を示す。同表によれば、非液状化地盤である忠岡と阿倍野の値が他の液状化の発生した可能性がある地盤の値と比べると大きくなっていることがわかる。ここでは示していないが、これらの他の観測地点の解析結果についても非液状化地盤のものは大きな値となっており、平均卓越振動数が2.0Hz以上の値を示す場合、非液状化地盤である可能性が高いといえる。

表2-4に平均卓越振動数と卓越振動数時間変化率を合わせて示す。これより、平均卓越振動数が小さく、卓越振動数時間変化率が大いときに地盤が液状化していることがわかる。さらに、これら以外の観測地点についても同様の解析を行った。その結果、液状化地盤においては平均卓越振動数が2.0Hz未満で、卓越振動時間変化が1.0Hz/s以上であつた。さらに、平均卓越振動数が2.0Hz未満で、卓越振動数時間変化が1.0Hz/s未満のものは、その地盤が最初から軟弱であつたり、付近で噴砂跡などがあり地盤の軟化が起こつた可能性が



ある地点が多かった。

以上より、卓越振動数の時間変化のグラフを定量的な指標で捉えたと、平均卓越振動数が2.0Hz未満の値を示すものは液状化が発生した可能性が高く、その中でも、卓越振動数時間変化率が1.0Hz/s以上の値を示す地盤は液状化の発生した可能性が非常に高いと考えられる。

#### 2-4-6 各指標による解析結果のまとめと液状化判定指標の提案

これまでの解析により、液状化判定に有効である指標として振幅特性を用いるものと振動数特性を用いるものの合計4つの指標を提案した。それぞれの判定基準を表2-5～2-8にまとめた。これら4つの判定指標は、それぞれ液状化地盤と非液状化地盤とを判別する有効な指標であるが、それぞれ誤判断する可能性も内在しており、各指標の持つ問題点を以下にまとめる。

最大上下／水平比については、上下／水平比の最大値をとっているため、衝撃波などの影響によって上下動にパルス的な大きな加速度を記録すると、液状化をしていなくても最大上下／水平比が大きくなり、液状化していると誤判断する可能性がある。また、直下型地震と海洋型地震によって上下／水平比の一般的な値の大きさが多少違うので注意を要する。

つぎに、フーリエスペクトル面積比とランニングスペクトル体積比について考える。まず、最初から軟弱な地盤である場合に液状化との判別がつきにくい。また、後揺れ波や、表面波の影響で加速度波形が長周期化した場合にも誤判断する可能性がある。

平均卓越振動数と卓越振動数時間変化率については、地震が起こってから地盤が液状化がするまでの時間が長く、高振動数成分が卓越している時間が長く続いた場合、平均卓越振動数が大きくなり、非液状化として判定する可能性がある。また、最初から非常に軟弱な地盤が液状化した場合、最初から卓越振動数が低いので、卓越振動数時間変化率が小さくなり、液状化と判定されない可能性がある。

このように、それぞれの液状化判定指標に別々の問題点があるので、それらを互いに補うために、これらを総合的に取り込んだ液状化判定指標を構築する必要がある。そこで、それぞれの液状化判定指標にポイントをつけ、それらの総合ポイントによって液状化地盤の判定を行うことにする。具体的には、次の順序で進める。

- (1) 最大上下／水平比が2.0以上のものは1ポイントとする（表2-9）。
- (2) フーリエスペクトル面積比が0.25以上のものは0.5ポイントとする（表2-10）。
- (3) ランニングスペクトル体積比が0.35以上のものは0.5ポイントとする（表2-11）。
- (4) 平均卓越振動数が2.0Hz未満のものは0.5ポイントとし、なおかつ卓越振動数時間変化率が1.0Hz/s以上の場合は1ポイントとする（表2-12）。
- (5) (4)までのポイントを合計する。
- (6) その合計されたポイントを液状化判定指標とし、その値が2.0以上の場合は液状化が起きた可能性が高く、3.0以上の場合は液状化が起きた可能性が非常に高いと考える（表2-13）。

表2-14に代表的な観測地点での上記の方法による液状化判定と、実際の液状化の有無を示す<sup>1~4, 6~9)</sup>。同表によれば、上記の方法による液状化判定が報告書などの記載とほぼ一致していることが分かる。まだデータ数が十分に多いとは言えないが、この方法により、各観測地点付近の地盤の液状化が判定ができるのではないかと期待される。

## 2-5 結 語

本章では、強震記録から液状化を判定する方法について考察し、液状化地盤の持つ振幅特性と振動数特性から総合的に判断する液状化判定指標を提案した。すなわち、振幅特性に注目した評価指標として最大上下／水平比を、振動数特性に注目した評価指標としてフーリエスペクトル面積比、ランニングスペクトル体積比、平均卓越振動数と卓越振動数時間変化率を提示し、それぞれの指標による評価結果を総合するという形で液状化判定指標を構築した。

本章で得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) 最大上下／水平比が2.0未満の場合には地盤が液状化している可能性は低く、2.0以上の場合には液状化した可能性は高いと考えられる。
- (2) 観測された強震記録のフーリエスペクトル面積比が0.25未満の場合には地盤が液状化している可能性が低く、0.25以上の場合には液状化している可能性は高いと考えられる。
- (3) 観測された強震記録のランニングスペクトル体積比が0.35未満の場合には地盤が液状化している可能性は低く、0.35以上の場合には液状化している可能性が高いと考えられる。
- (4) 平均卓越振動数が2.0Hz未満の値を示すものは液状化が発生した可能性が高く、その中でも、卓越振動数時間変化率が1.0Hz/s以上の値を示す地盤では液状化が発生した可能性が非常に高いと考えられる。
- (5) 本研究で提案する液状化判定指標が2.0以上の場合、その地盤で液状化が発生した可能性は高く、3.0以上の場合その可能性は非常に高いと考えられる。

## 参考文献

- 1) 岡二三生・杉戸真太・八嶋 厚・古川浩司：兵庫県南部地震における地盤災害，第30回土質工学研究発表会発表講演集，3分冊の1，pp.111-112，1995。
- 2) 松永康男・井合 進・亀岡知弘：平成5年度釧路沖地震時の岸壁の液状化対策の効果について，土木学会第22回地震工学研究発表会講演概要，pp.399-402，1992。
- 3) 陶野郁雄・遠藤邦彦・森本 巖：平成7年兵庫県南部地震による液状化災害，第30回土質工学研究発表会発表講演集，3分冊の1，pp.113-114，1995。
- 4) 濱田政則・磯山龍二・若松加寿江：1995年兵庫県南部地震 液状化，地盤変位及び地盤条件，p.23，1995。

- 5) 科学技術庁防災科学技術研究所：K－N E T，<http://www.k-net.bosai.go.jp>
- 6) 飛島建設株式会社：1997年5月13日鹿児島県北西部地震被害調査報告書，p.92，1997.
- 7) 運輸省港湾技術研究所：港湾技研資料，No.511，1983年日本海中部地震港湾被害報告，p.34，1985.
- 8) 運輸省港湾技術研究所：1993年北海道南西沖地震による港湾被害報告，港湾技研資料，No.791，p.188，1994.
- 9) J. Matasovic and M.Vucetic：Analysis of Seismic Records from the Wildlife Liquefaction Site, Proc. of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, No.209, 1996.

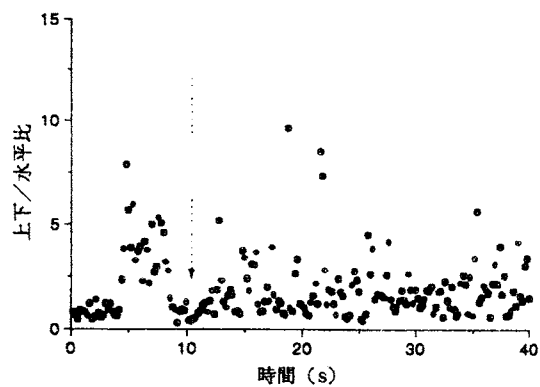


図 2-1 ポートアイランド(兵庫県南部地震)の  
上下/水平比

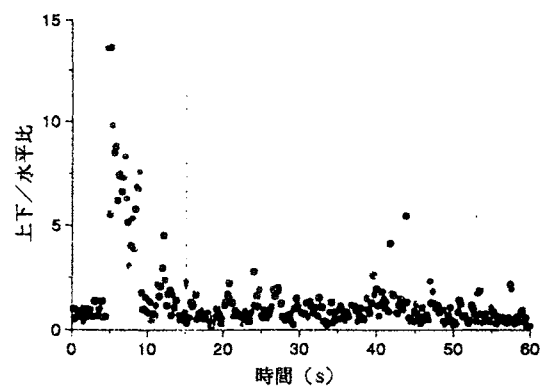


図 2-2 六甲アイランド(兵庫県南部地震)の  
上下/水平比

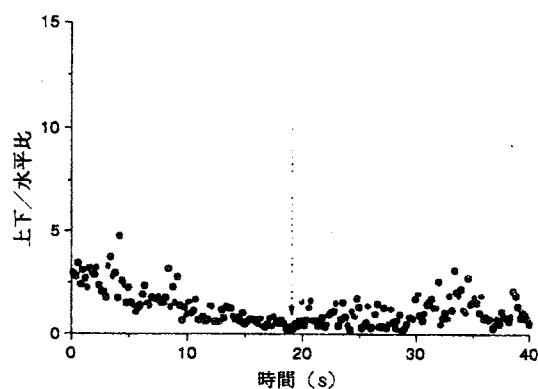


図 2-3 釧路港(釧路沖地震)の  
上下/水平比

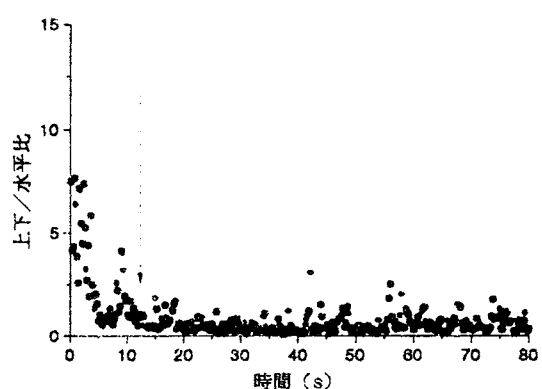


図 2-4 Wildlife(Superstition Hills 地震)の  
上下/水平比

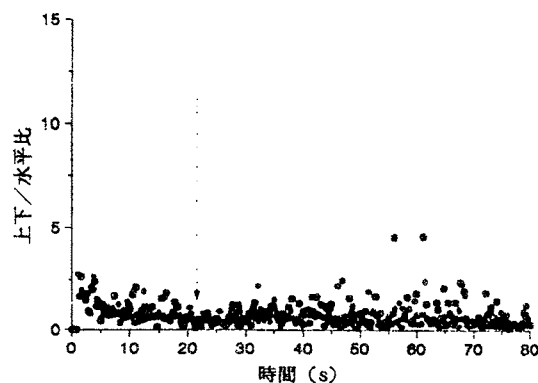


図 2-5 青森港(十勝沖地震)の  
上下/水平比

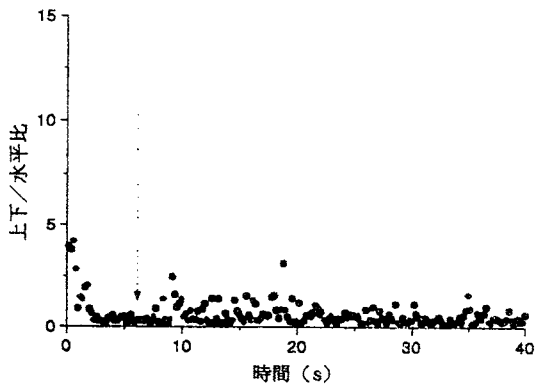


図 2-6 JR 鷹取駅（兵庫県南部地震）  
の上下／水平比

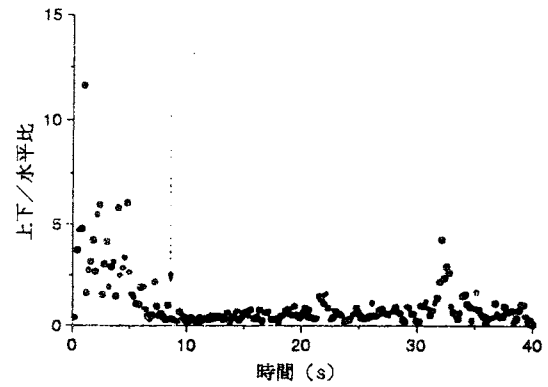


図 2-7 尼崎（兵庫県南部地震）  
の上下／水平比

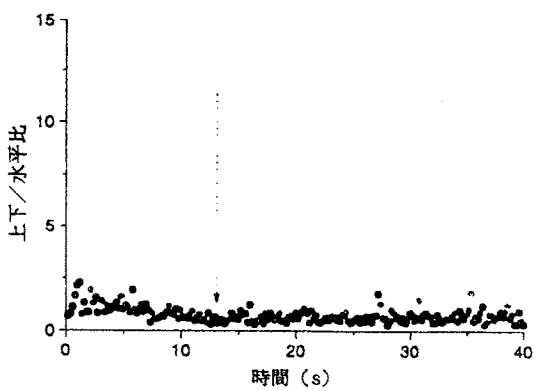


図 2-8 千早赤阪（兵庫県南部地震）  
の上下／水平比

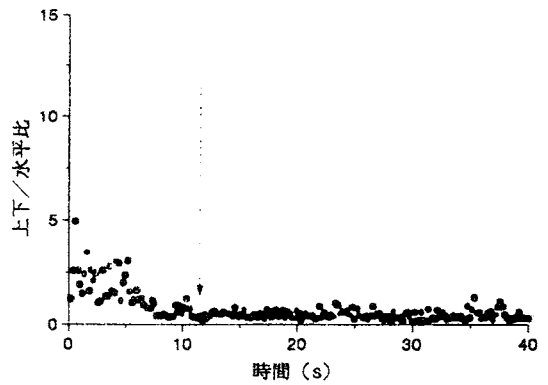


図 2-9 堺（兵庫県南部地震）  
の上下／水平比

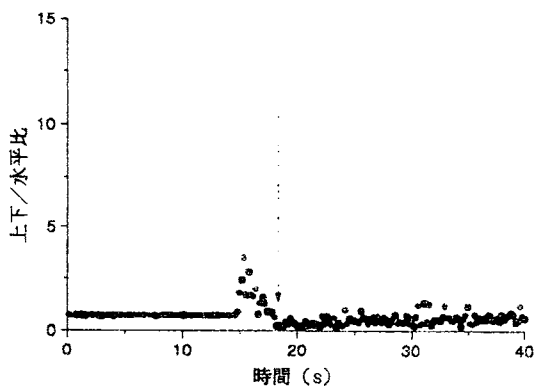


図 2-10 阿久根（鹿児島県北西部地震）  
の上下／水平比

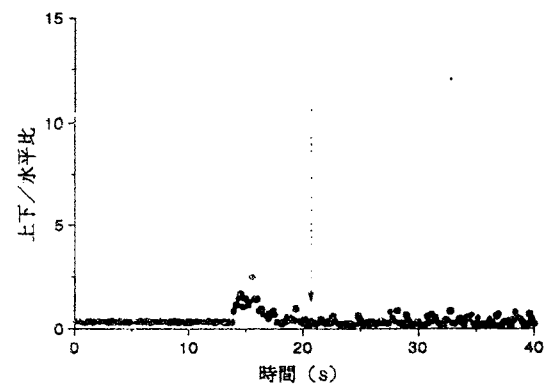


図 2-11 川内（鹿児島県北西部地震）  
の上下／水平比

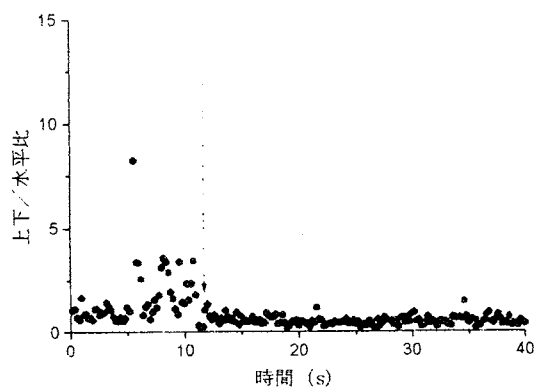


図 2-12 奥村組筑波研究所（茨城県南西部地震）の上下／水平比

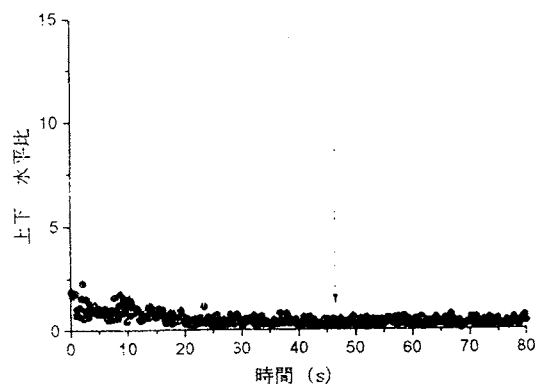


図 2-13 室蘭港（北海道南西沖地震）の上下／水平比

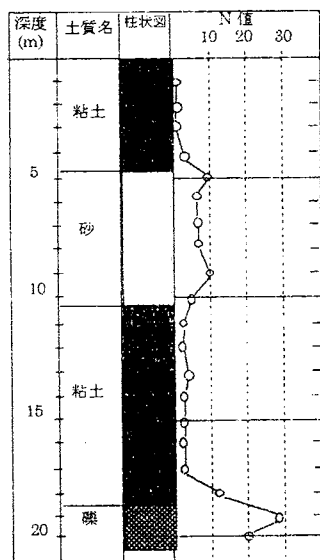


図 2-14 阿久根の地盤

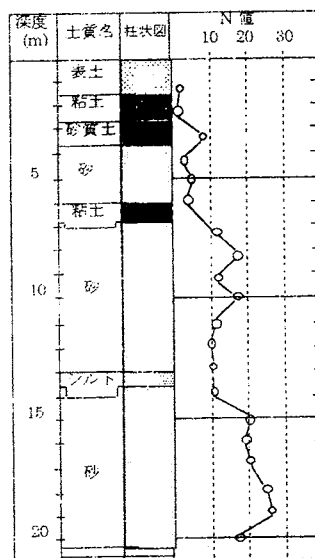


図 2-15 川内の地盤

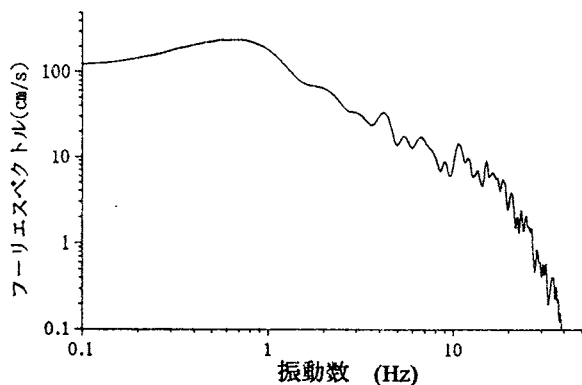


図 2-16 ポートアイランド（兵庫県南部地震）の  
フーリエスペクトル

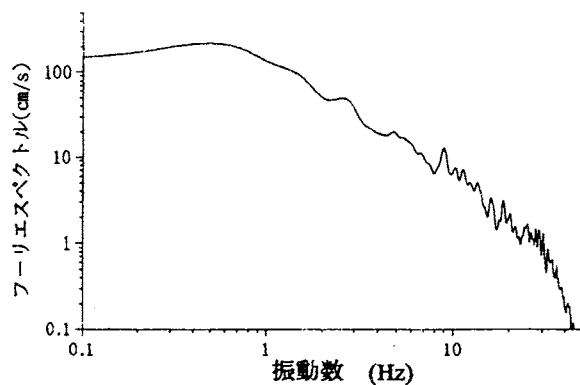


図 2-17 六甲アイランド（兵庫県南部地震）の  
フーリエスペクトル

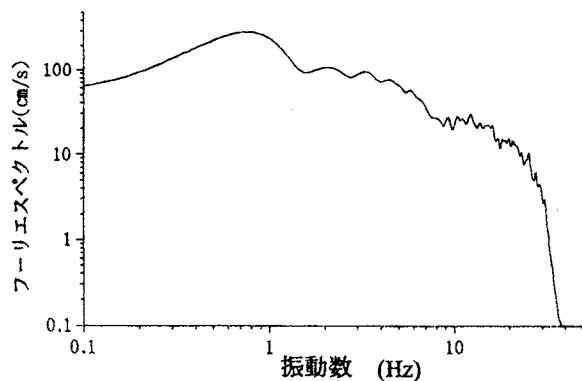


図 2-18 釧路港（釧路沖地震）の  
フーリエスペクトル

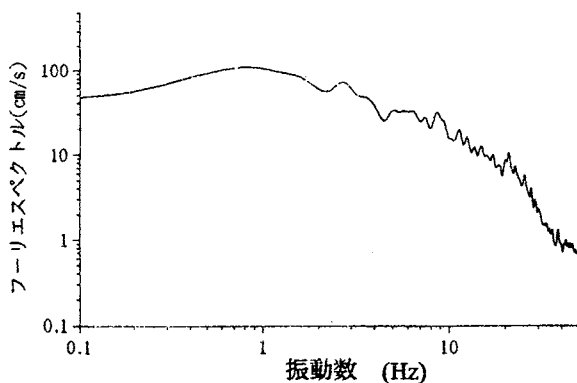


図 2-19 Wildlife（Superstition Hills 地震）の  
フーリエスペクトル

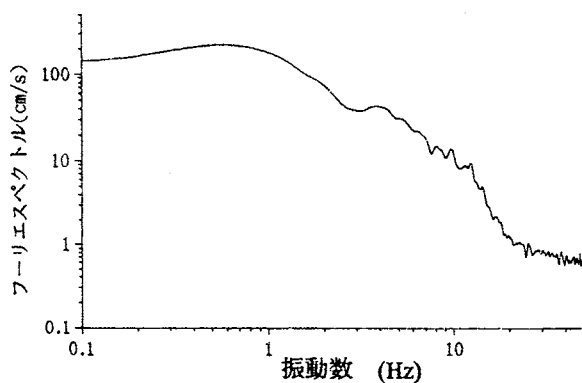


図 2-20 青森港（十勝沖地震）の  
フーリエスペクトル

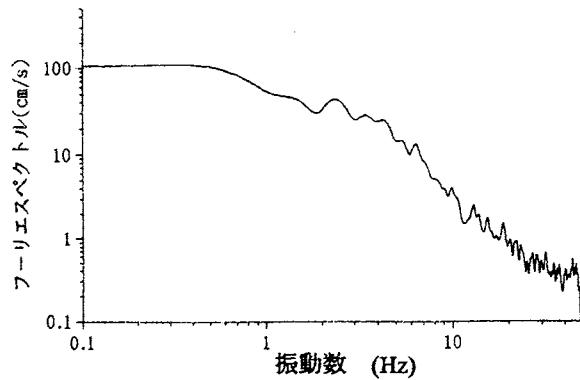


図 2-21 川岸町県営アパート（新潟地震）の  
フーリエスペクトル

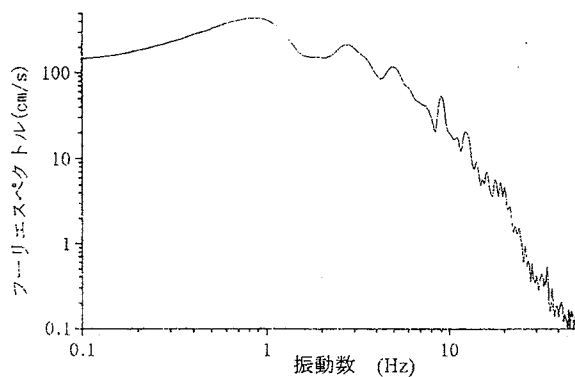


図 2-22 JR 鷹取駅（兵庫県南部地震）の  
フーリエスペクトル

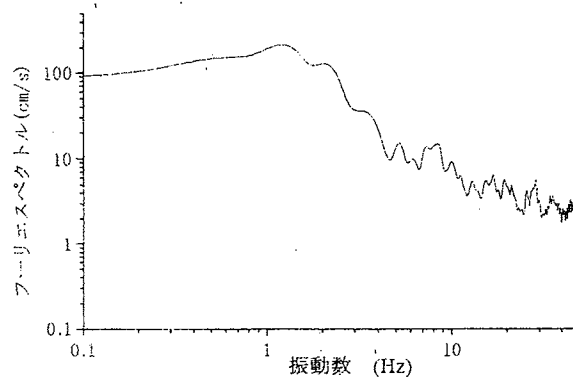


図 2-23 尼崎（兵庫県南部地震）の  
フーリエスペクトル

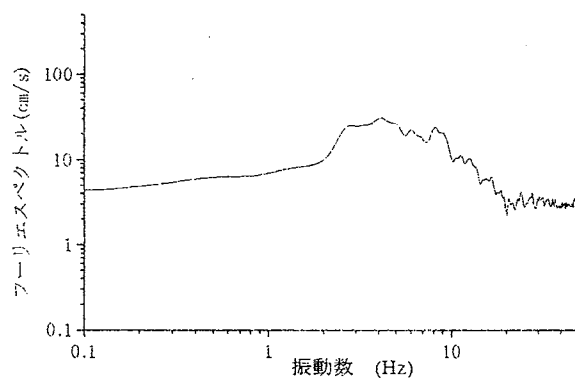


図 2-24 千早赤阪（兵庫県南部地震）の  
フーリエスペクトル

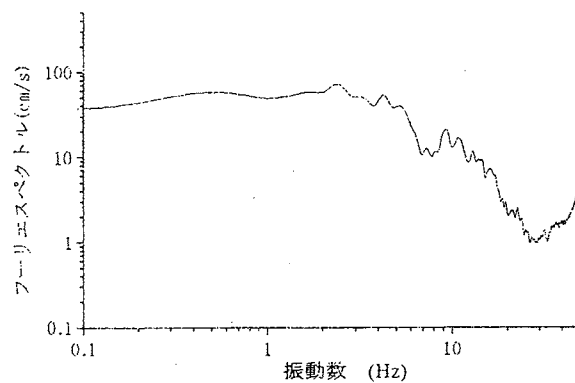


図 2-25 堺（兵庫県南部地震）の  
フーリエスペクトル



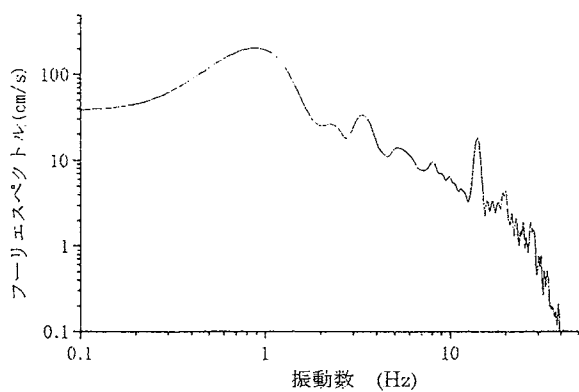


図 2-26 阿久根（鹿児島県北西部地震）の  
フーリエスペクトル

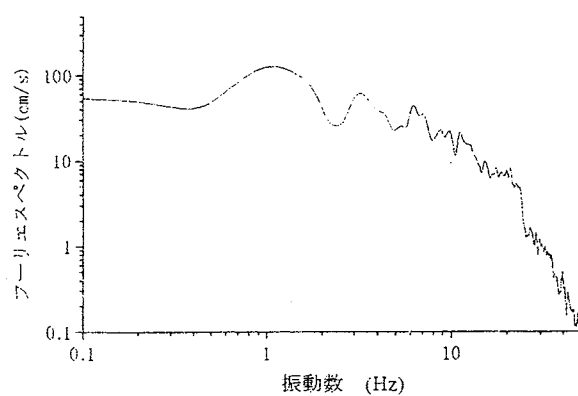


図 2-27 川内（鹿児島県北西部地震）の  
フーリエスペクトル

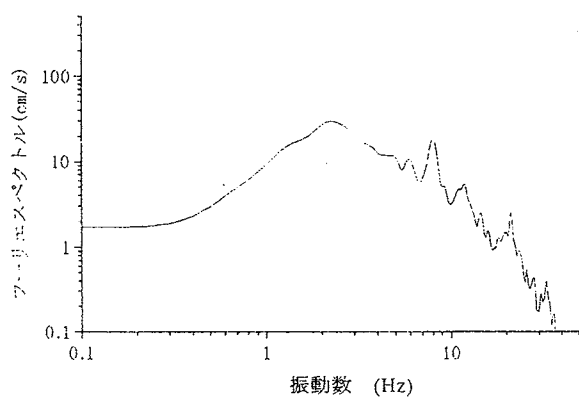


図 2-28 奥村組筑波研究所(茨城県南西部地震)の  
フーリエスペクトル

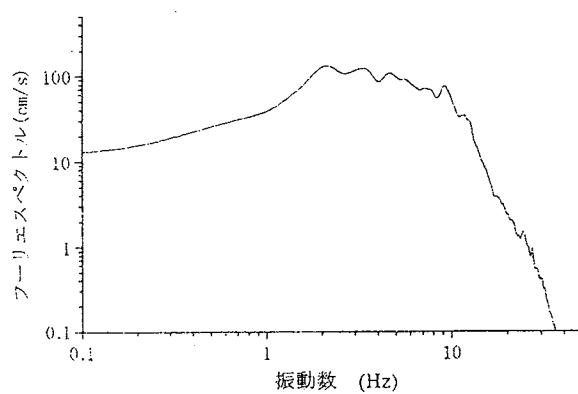


図 2-29 室蘭港（北海道南西沖地震）の  
フーリエスペクトル

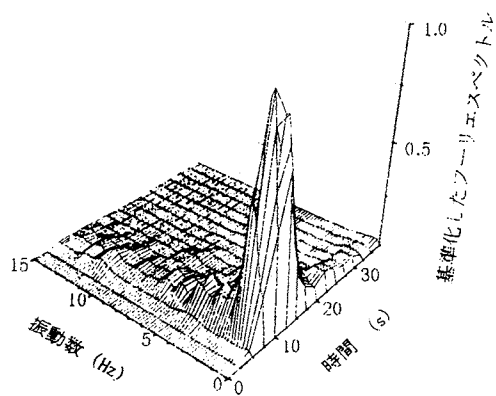


図 2-30 ポートアイランド（兵庫県南部地震）のランニングスペクトル

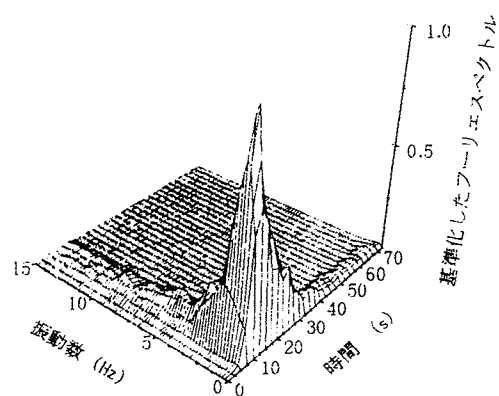


図 2-31 六甲アイランド（兵庫県南部地震）のランニングスペクトル

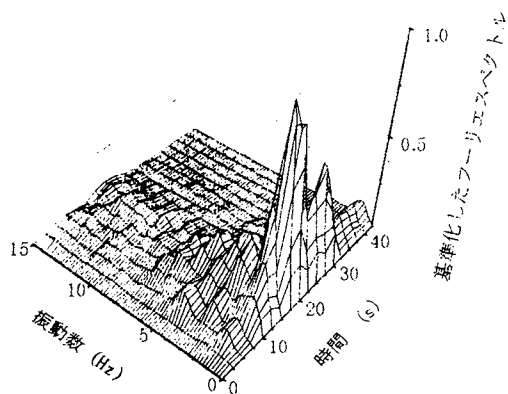


図 2-32 釧路港（釧路沖地震）のランニングスペクトル

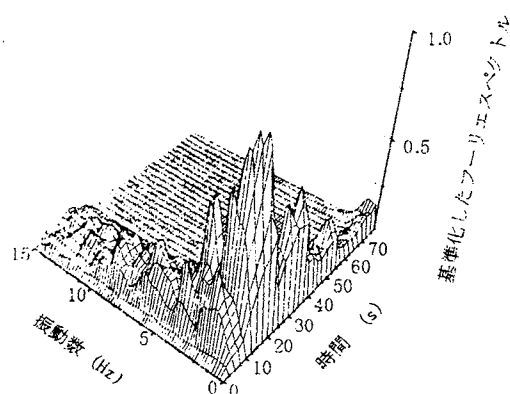


図 2-33 Wildlife（Superstition Hills 地震）のランニングスペクトル

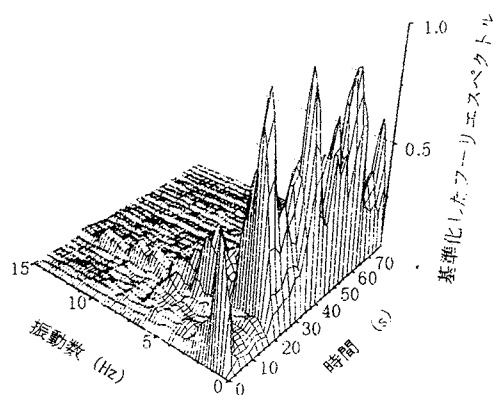


図 2-34 青森港（十勝沖地震）の  
ランニングスペクトル

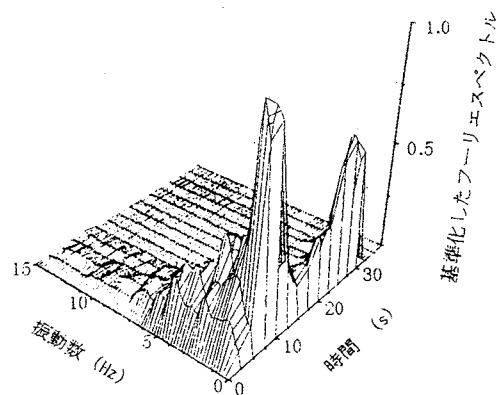


図 2-35 川岸町県営アパート（新潟地震）の  
ランニングスペクトル

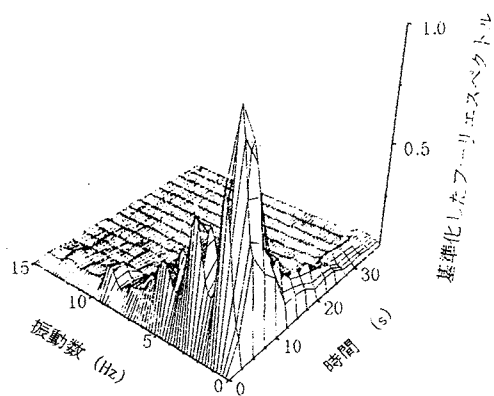


図 2-36 JR 鷹取駅（兵庫県南部地震）の  
ランニングスペクトル

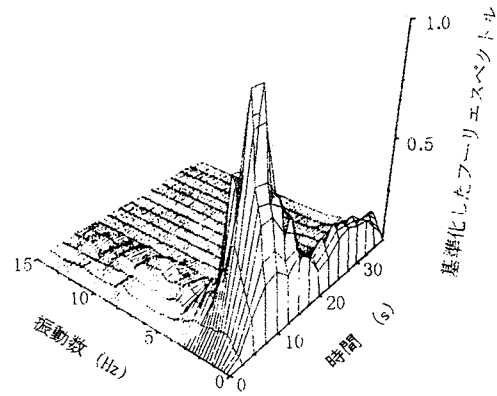


図 2-37 尼崎（兵庫県南部地震）の  
ランニングスペクトル

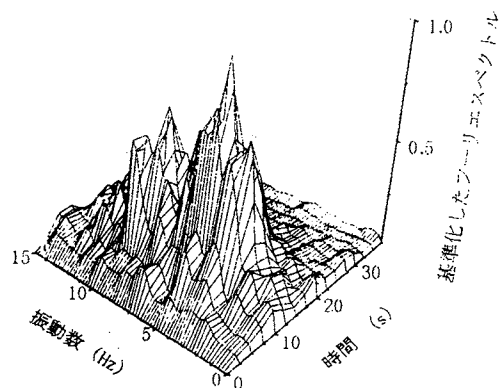


図 2-38 千早赤阪（兵庫県南部地震）のランニングスペクトル

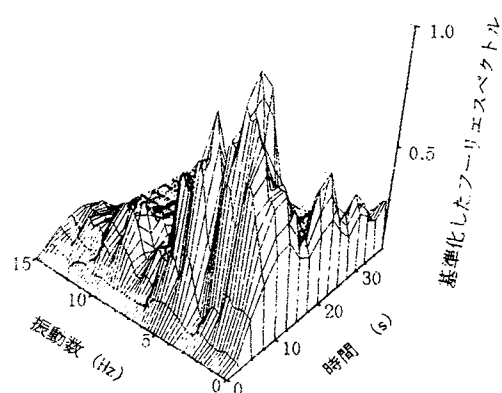


図 2-39 堺（兵庫県南部地震）のランニングスペクトル

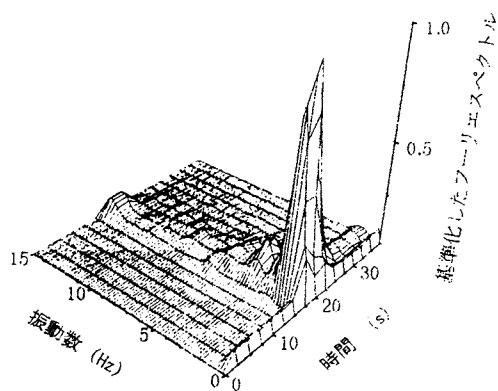


図 2-40 阿久根（鹿児島県北西部地震）のランニングスペクトル

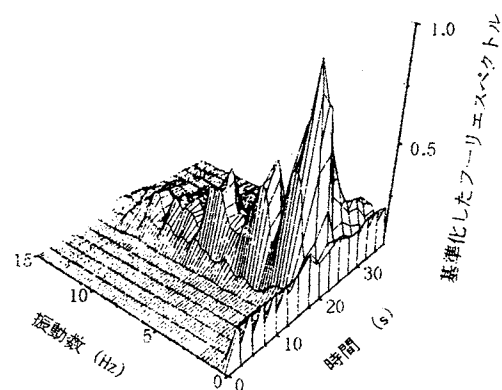


図 2-41 川内（鹿児島県北西部地震）のランニングスペクトル

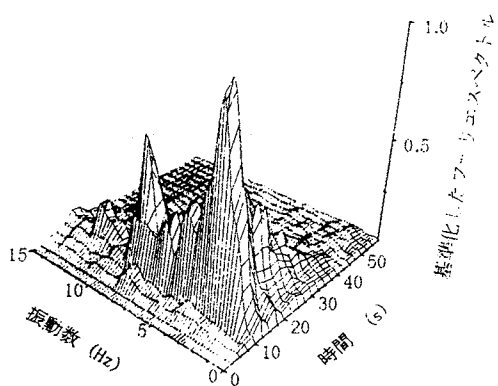


図 2-42 奥村組筑波研究所（茨城県南西部地震）のランニングスペクトル

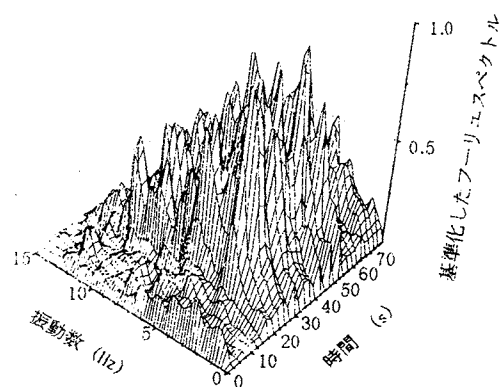


図 2-43 室蘭港（北海道南西沖地震）のランニングスペクトル

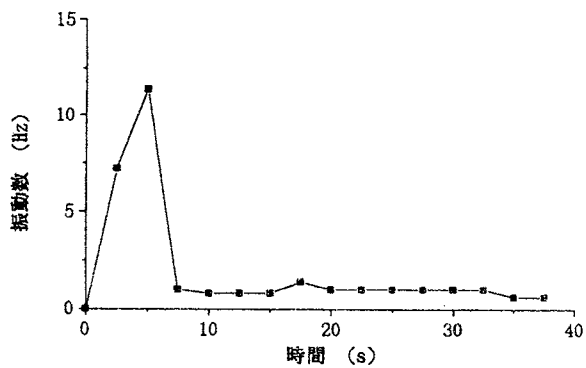


図 2-44 ポートアイランド（兵庫県南部地震）の卓越振動数の時間変化

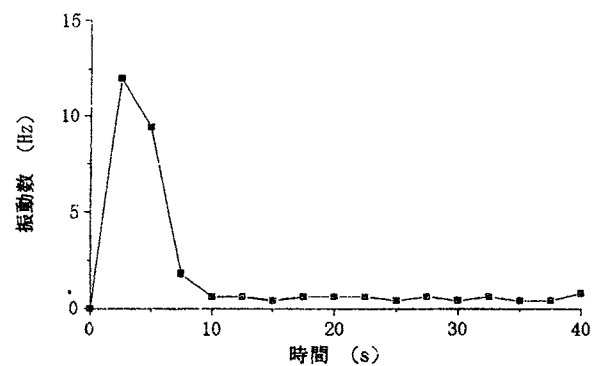


図 2-45 六甲アイランド（兵庫県南部地震）の卓越振動数の時間変化

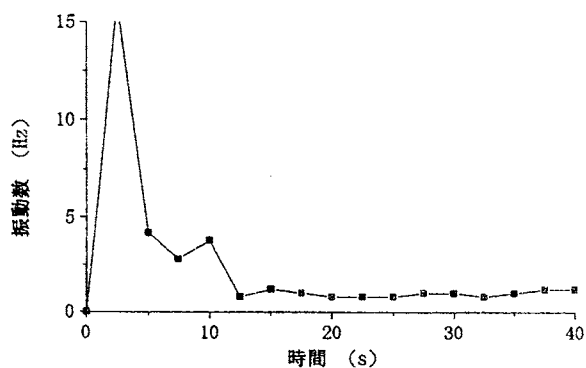


図 2-46 釧路港（釧路沖地震）の卓越振動数の時間変化

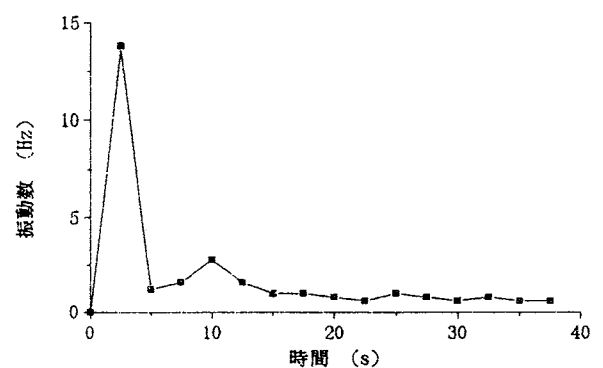


図 2-47 Wildlife（Superstition Hills 地震）の卓越振動数の時間変化

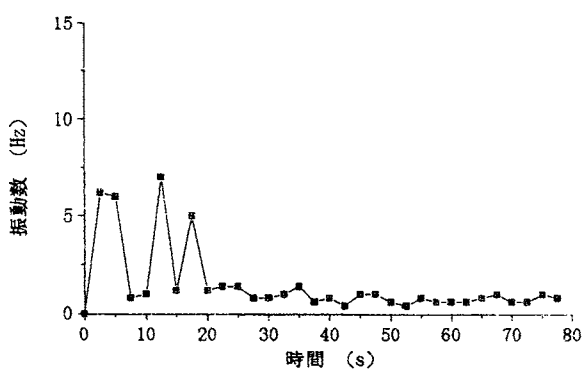


図 2-48 青森港（十勝沖地震）の卓越振動数の時間変化

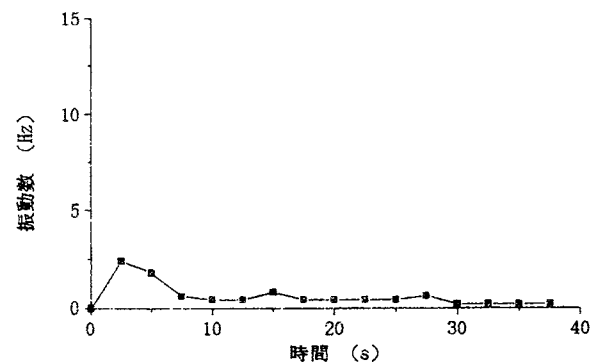


図 2-49 川岸町県営アパート（新潟地震）の卓越振動数の時間変化

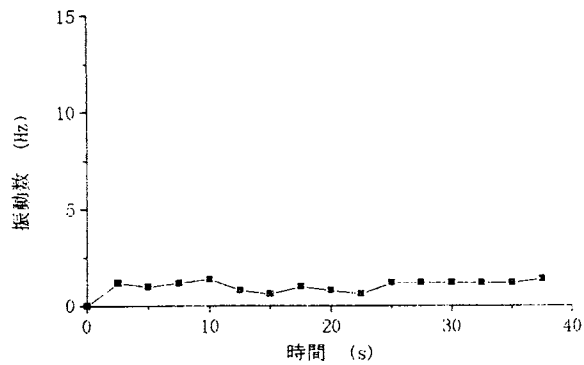


図 2-50 JR 鷹取駅（兵庫県南部地震）の卓越振動数の時間変化

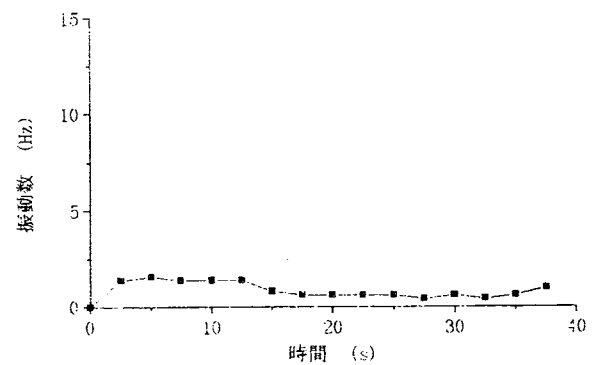


図 2-51 尼崎（兵庫県南部地震）の卓越振動数の時間変化

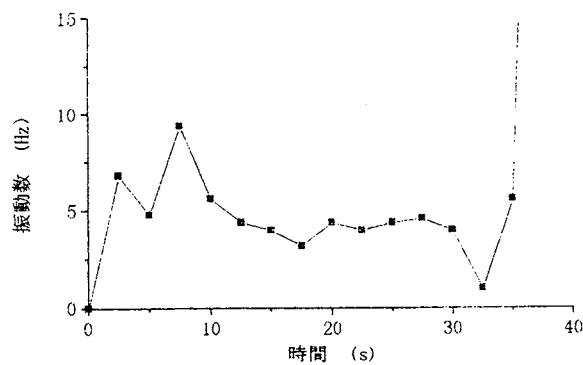


図 2-52 千早赤阪（兵庫県南部地震）の卓越振動数の時間変化

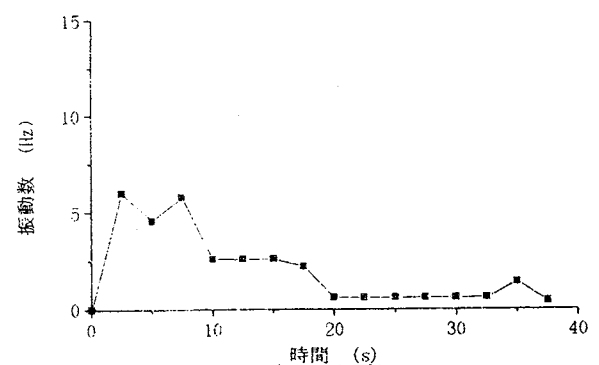


図 2-53 堺（兵庫県南部地震）の卓越振動数の時間変化

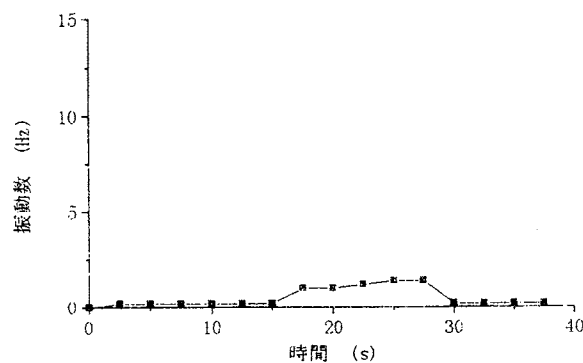


図 2-54 阿久根（鹿児島県北西部地震）の卓越振動数の時間変化

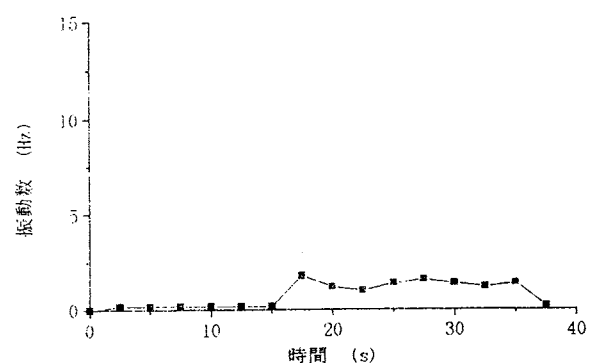


図 2-55 川内（鹿児島県北西部地震）の卓越振動数の時間変化

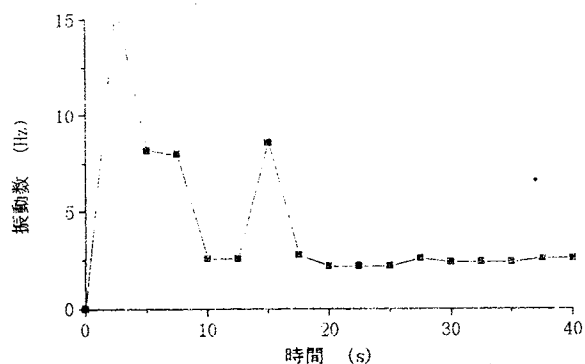


図 2-56 奥村組筑波研究所 (茨城県南西部地震) の卓越振動数の時間変化

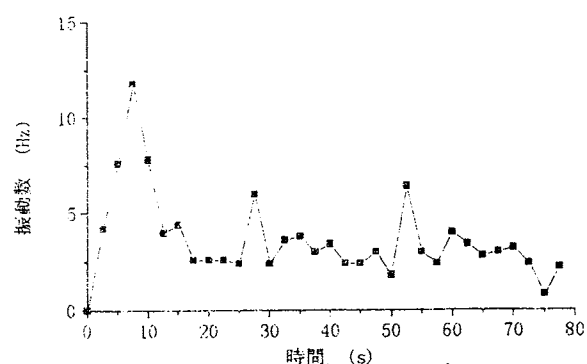


図 2-57 室蘭港 (北海道南西沖地震) の卓越振動数の時間変化

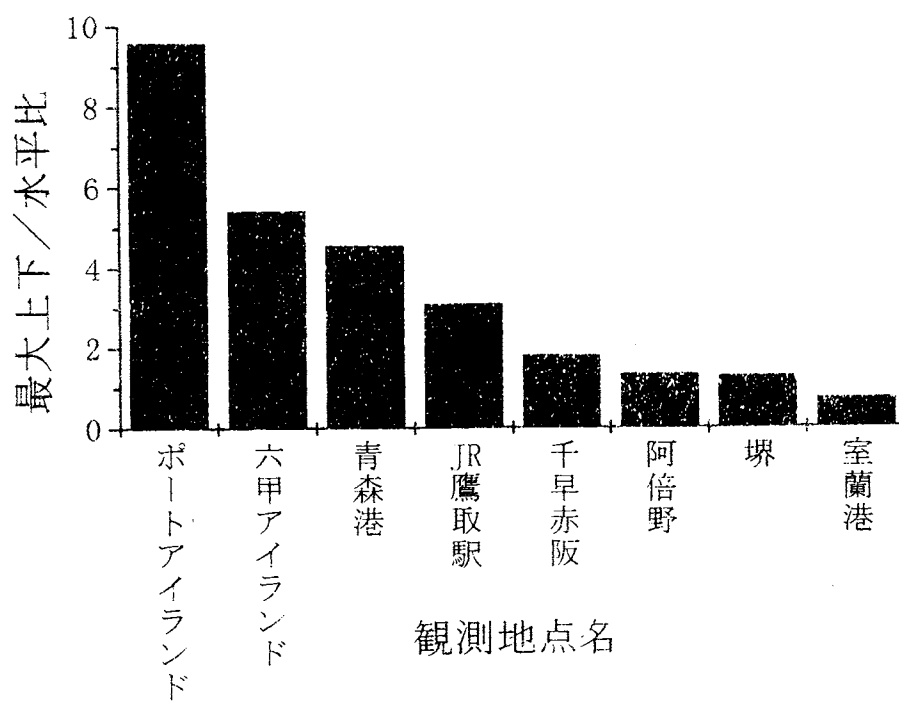


図 2-58 観測地点ごとの最大上下／水平比

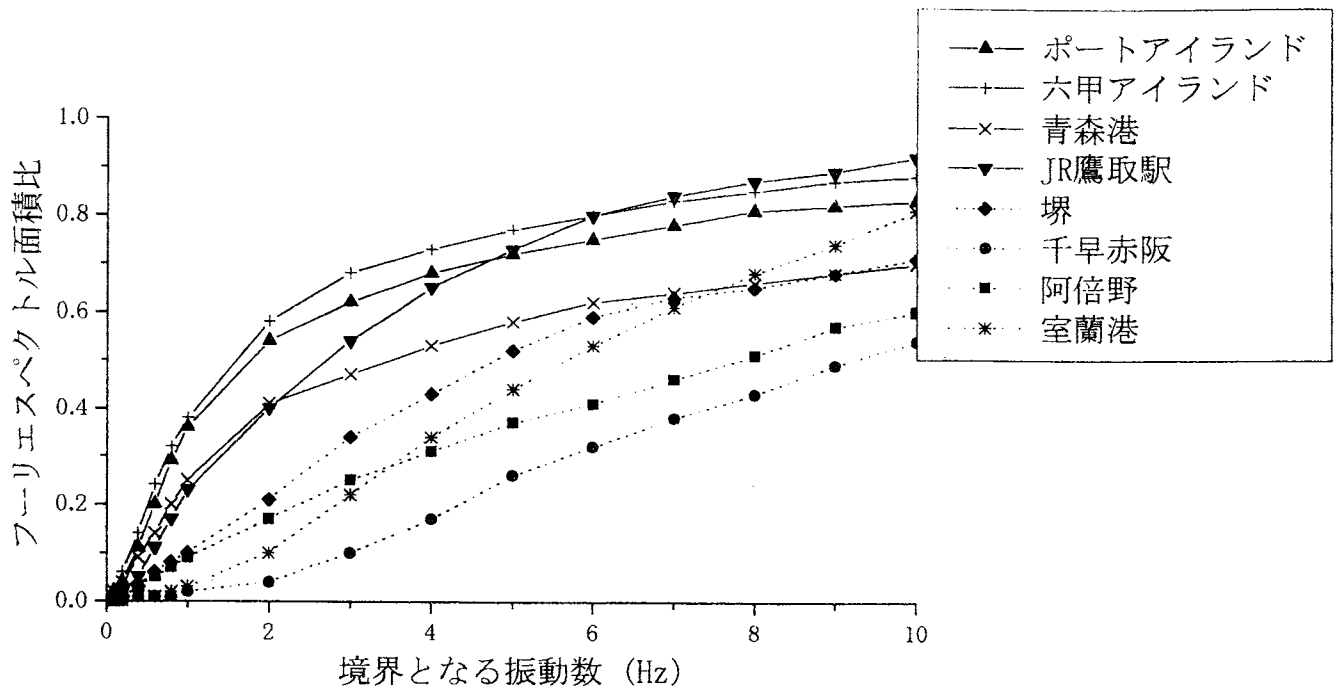


図 2-59 境界となる振動数を変化させたときのフーリエスペクトル面積比

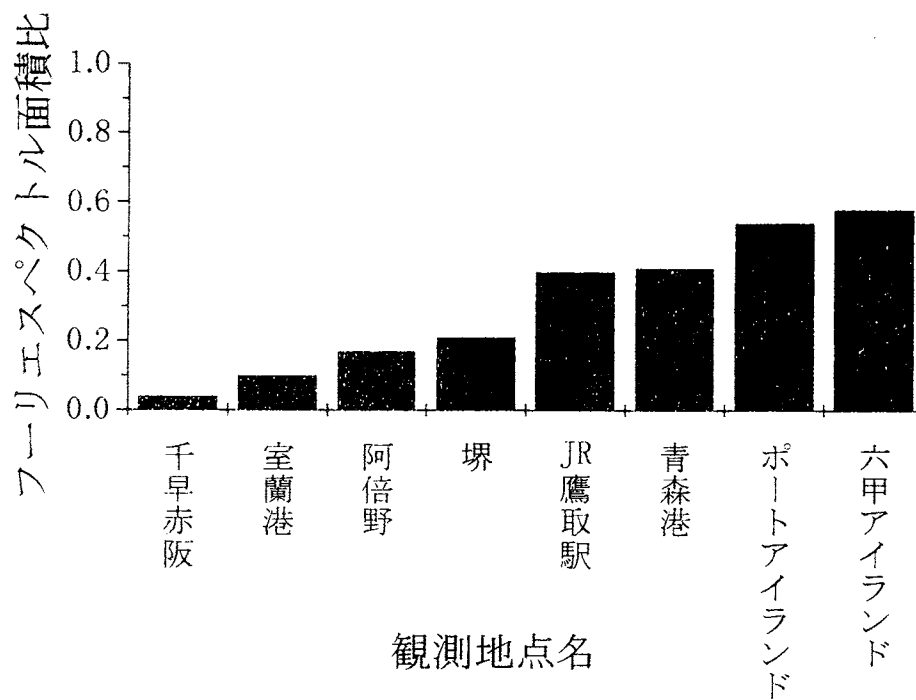


図 2-60 各観測地点のフーリエスペクトル面積比



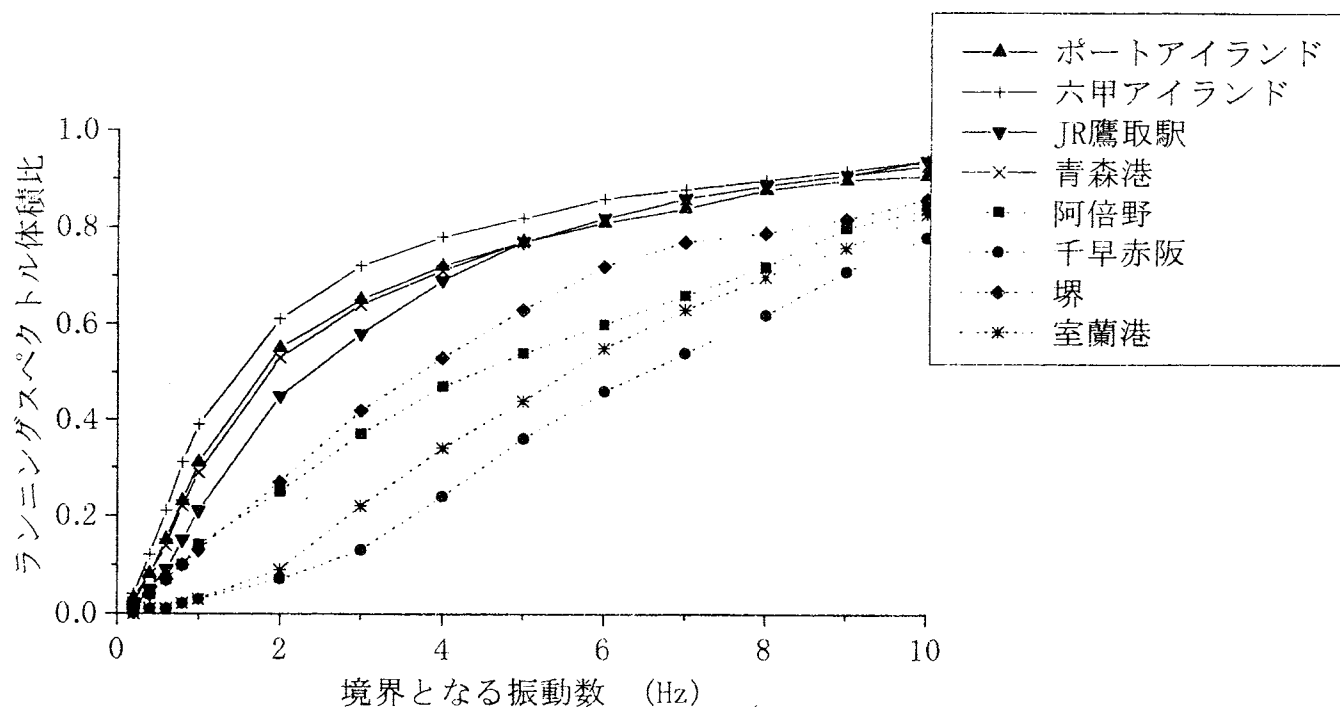


図 2-61 境界となる振動数を変化させたときのランニングスペクトル体積比

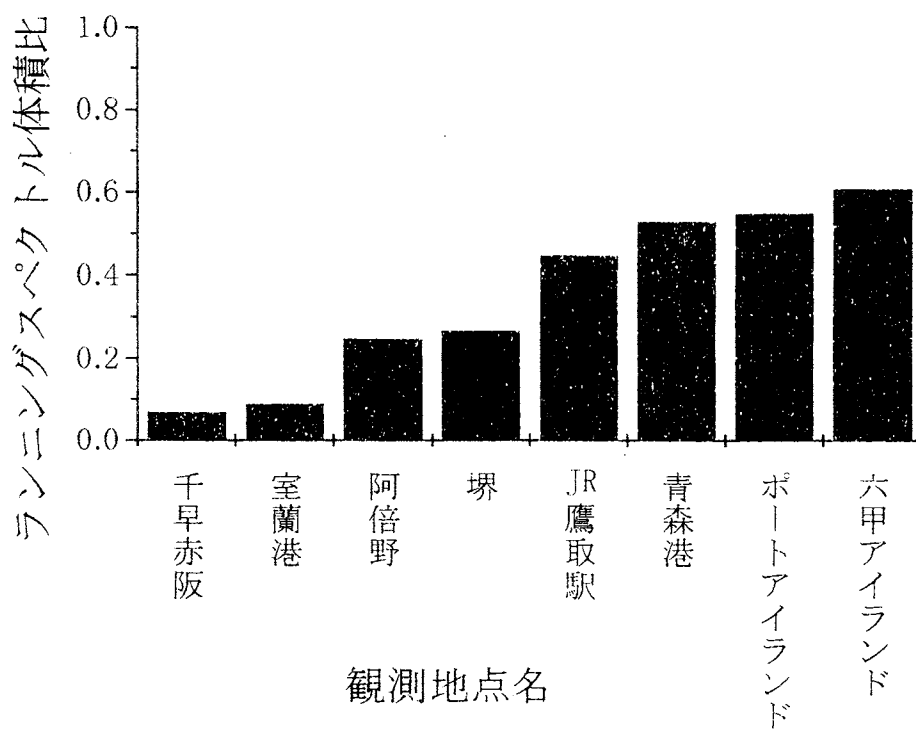


図 2-62 各観測地点のランニングスペクトル体積比

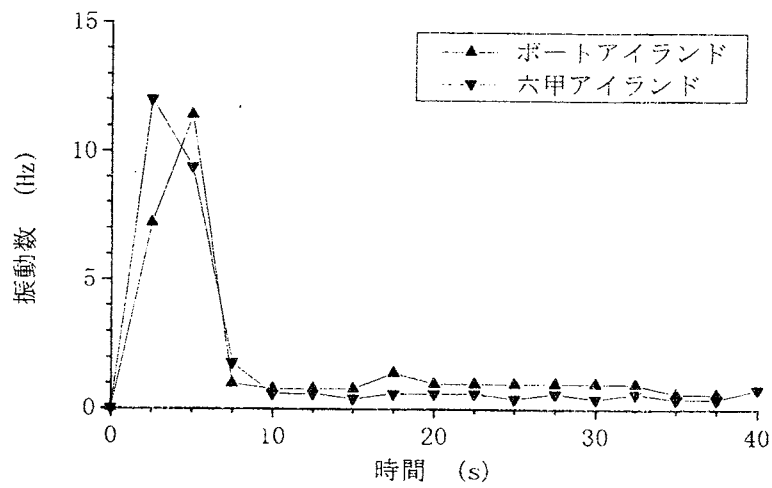


図 2-63 液状化地盤での卓越振動数の変化

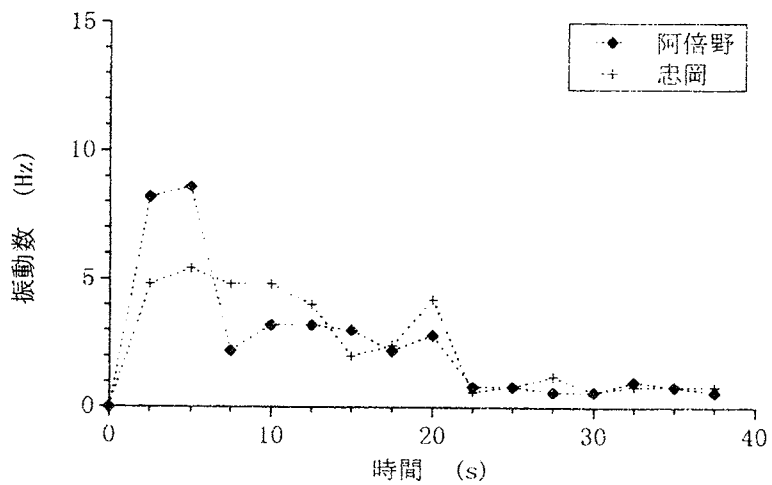


図 2-64 非液状化地盤での卓越振動数の時間変化

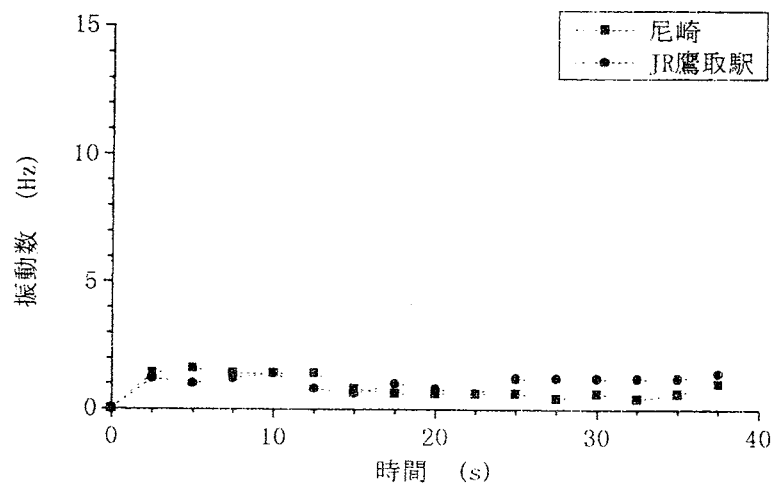


図 2-65 地盤が軟化した観測地点の卓越振動数の時間変化

表 2-1 各観測地点の地盤情報

地盤情報	観測地点名	観測地震
液状化が発生した 地盤	ポートアイランド	兵庫県南部地震(1995.01.17)
	六甲アイランド	"
	青森港	十勝沖地震(1968.05.16)
付近に噴砂後などがあり 軟化が起こったと考えられる地盤	JR鷹取駅	兵庫県南部地震(1995.01.17)
非液状化地盤	千早赤阪	"
	阿倍野	"
	堺	"
	室蘭港	北海道南西沖地震(1993.07.12)

表 2-2 各観測地点の卓越振動数時間変化率

観測地点名	卓越振動数時間変化率(Hz/s)
ポートアイランド	4.2
六甲アイランド	3.0
阿倍野	2.6
忠岡	1.4
尼崎	0.2
JR鷹取駅	0.2

表 2-3 各観測地点の平均卓越振動数

観 測 地 点 名	平 均 卓 越 振 動 数 (Hz)
尼 崎	0.8
JR 鷹 取 駅	1.0
六 甲 アイランド	1.8
ポ ー ト アイランド	1.9
忠 岡	2.4
阿 倍 野	2.4

表 2-4 各観測地点の平均卓越振動数と卓越振動数時間変化率

観測地点名	平均卓越振動数(Hz)	卓越振動数時間変化率(Hz/s)
ポートアイランド	1.9	2.2
六甲アイランド	1.8	3.0
阿倍野	2.4	2.6
忠岡	2.4	1.4
尼崎	0.8	0.2
JR鷹取駅	1.0	0.2

表 2-5 最大上下／水平比による液状化判定基準

最大上下／水平比	液状化判定
2.0以上	液状化が発生した可能性が高い
2.0未満	液状化が発生した可能性が低い

表 2-6 フーリエスペクトル面積比による液状化判定基準

フーリエスペクトル面積比	液状化判定
0.25以上	液状化が発生した可能性が高い
0.25未満	液状化が発生した可能性が低い

表 2-7 ランニングスペクトル体積比による液状化判定基準

ランニングスペクトル体積比	液状化判定
0.35以上	液状化が発生した可能性が高い
0.35未満	液状化が発生した可能性が低い

表 2-8 卓越振動数の時間変化による液状化判定基準

平均卓越振動数(Hz)	卓越振動数時間変化率(Hz/s)	液状化判定
2.0未満	1.0以上	液状化が発生した可能性が非常に高い
	1.0未満	液状化が発生した可能性が高い
2.0以上		液状化が発生した可能性が低い

表 2-9 最大上下／水平比による液状化判定指標

最大上下／水平比	液状化判定指標
2.0以上	1.0
2.0未満	0.0

表 2-10 フーリエスペクトル面積比による液状化判定指標

フーリエスペクトル面積比	液状化判定指標
0.25以上	0.5
0.25未満	0.0

表 2-11 ランニングスペクトル体積比による液状化判定指標

ランニングスペクトル体積比	液状化判定指標
0.35以上	0.5
0.35未満	0.0

表 2-12 卓越振動数の時間変化による液状化判定指標

平均卓越振動数(Hz)	卓越振動数時間変化率(Hz/s)	液状化判定指標
2.0未満	1.0以上	1.0
	1.0未満	0.5
2.0以上		0.0

表 2-13 液状化判定指標による液状化判定基準

液状化判定指標	液状化判定
3.0以上	液状化が発生した可能性が非常に高い
2.0以上3.0未満	液状化が発生した可能性が高い
2.0未満	液状化が発生した可能性が低い

表 2-14 実際の液化化の有無と液化化判定指標の相関

液状化報告	場所	観測地震	液状化判定指標
○	Wildlife	Superstition Hills地震(1987.00.00)	3
○	ポートアイランド	兵庫県南部地震(1995.01.17)	3
○	六甲アイランド	〃	3
○	東神戸大橋	〃	3
○	青森港	十勝沖地震(1968.05.16)	3
△	尼崎	兵庫県南部地震(1995.01.17)	2.5
△	JR鷹取駅	〃	2.5
○	函館港	北海道南西沖地震(1993.07.12)	2.5
△	釧路港	釧路沖地震(1993.01.15)	2
×	神戸大学	兵庫県南部地震(1995.01.17)	1.5
×	青森港	日本海中部地震(1983.05.26)	1.5
×	宝塚	兵庫県南部地震(1995.01.17)	1.5
×	阿久根	鹿児島県北西部地震(1997.03.26)	1.5
×	川内	〃	1.5
×	弥栄	兵庫県南部地震(1995.01.17)	1.5
×	堺	〃	1
×	与野	〃	0
×	筑波実験所	?	0
×	茨城	兵庫県南部地震(1995.01.17)	0
×	阿倍野	〃	0
×	室蘭港	北海道南西沖地震(1993.07.12)	0
×	本山	兵庫県南部地震(1995.01.17)	0
×	千早	〃	0
×	忠岡	〃	0

## 液状化報告

- : 液状化が起きたとされる地盤  
△ : 軟化現象が起きた、または、付近に噴砂跡などがある地盤  
× : 非液状化地盤

## 第3章 液状化領域の空間分布推定

### 3-1 概説

従来より地盤の液状化を判定する手法としては、ボーリングデータを基に算出する $F_L$ 値を用いた簡易法<sup>1)</sup>が実務上最も多く用いられている。しかし、これはボーリングデータの存在する地点の任意深度における液状化抵抗率を評価するものであり、広い範囲を対象とする場合や、液状化領域の分布状況を空間的に評価したい場合などには、数多くのデータを入手する必要がある。また、データの存在しない地域では、何らかの手法で補間して評価しなければならない。

このような観点から本章では、対象地域に存在する有限個のボーリングデータを基に、データの無い地点の地盤物性値を推定し、液状化領域を空間的に評価する手法について検討を行う。液状化領域の空間分布推定法としては、多次元ガウス分布を用いた方法<sup>2)</sup>、形状関数を用いた方法<sup>3)</sup>、クリギング法を用いた方法<sup>3)</sup>などが提案されており、その有効性や問題点などについて検討が行われている。本研究では、物性値の空間相関を考慮した推定が可能な、地盤統計手法の1つであるクリギング法<sup>4)</sup>を利用して、1964年新潟地震における新潟市、1984年日本海中部地震における能代市、1995年兵庫県南部地震における神戸市の液状化被害事例をケーススタディとして、推定結果の妥当性や利用する上での問題点などについて検討を行った。

### 3-2 解析手法

#### 3-2-1 解析の手順

本研究で推定する地盤物性値は、道路橋示方書の方法に基づいて算出した液状化抵抗率 $F_L$ 値と、標準貫入試験より得られる地盤の硬軟を示す指標の $N$ 値である。両者とも対象領域にあるボーリングデータより得られるものであり、深さ方向にほぼ1m毎に連続的に値が求められる。したがって、クリギング法はデータ密度の小さい水平方向分布の推定のみに適用し、深度方向については任意深度で推定した平面分布の結果を重ね合わせることで求めた。

#### 3-2-2 クリギング法<sup>4)</sup>

クリギング法は空間的に変動する物性値の分布を確立場として表現し、対象領域にある既知点の物性値の空間相関を考慮しながら、未知点における推定値及び推定誤差を求める手法であり、それらの分布図を客観的に描けるという利点を持っている。

任意地点 $x_0$ における物性値の推定値 $\hat{v}(x_0)$ は、既存の $n$ 個の観測値 $v(x_i)$ の重み付き線形和で求まる。ここで、重みは $w_i$ である。



$$\hat{V}(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot V(x_i) \quad (3-1)$$

推定値と真値との差である推定誤差を  $R(x_0)$  とすると、その期待値は以下の通りである。

$$E[R(x_0)] = E[\hat{V}(x_0) - V(x_0)] \quad (3-2)$$

ここで、確率過程  $V(x_i)$  に定常性を仮定すると上式の推定誤差の期待値はゼロとなり、以下に示す推定値の不偏条件式が導かれる。

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3-3)$$

また、式 (3-4) に示す推定誤差の分散  $\hat{\sigma}_R^2$  よりラグランジェの未定乗数法を用いてその最小値を求めると、式 (3-5) が得られる。

$$\hat{\sigma}_R^2 = \text{Var}[R(x_0)] = E[\{\hat{V}(x_0) - V(x_0)\}^2] \quad (3-4)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j \cdot \gamma_{ij} - \mu = \gamma_{i0} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (3-5)$$

ここで、 $\hat{\gamma}$  はバリオグラムと呼ばれる物性値の空間分布特性を表す値であり、共分散関数  $\hat{c}$  との間に以下の関係が成り立つ。

$$\hat{\gamma}_{ij} = \hat{\sigma}^2 - \hat{c}_{ij} \quad (3-6)$$

さらに、式 (3-4) の推定誤差の分散は以下のように変換される。

$$\hat{\sigma}_R^2 = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \tilde{\gamma}_0 + \mu \quad (3-7)$$

式 (3-3) と式 (3-5) を連立して解けば、重み  $w_i$  とラグランジェの未定係数  $\mu$  が求まり、それらを式 (3-1) と式 (3-7) に代入することにより、任意地点  $x_0$  における推定値  $\hat{V}(x_0)$  と推定誤差の分散  $\hat{\sigma}_R^2$  が求まる。

### 3-2-3 セミバリオグラム<sup>4)</sup>

物性値の空間分布特性の表現方法としては、共分散関数、相関関数、バリオグラムなどがあるが、本研究では物性値の分散が無限に大きい場合でも、関数のモデル化が容易であるという利点を持つセミバリオグラムを用いる。

セミバリオグラムは次式に示すように2地点間の物性値の二乗平均の形で示される。

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2} E\{[V_i - V_j]^2\} \quad (3-8)$$

セミバリオグラムは距離のみの関数であるが、得られたデータより連続関数である理論的なセミバリオグラム  $\gamma_{ij}$  を算出することは不可能である。したがって、次式に示すように任意の距離に存在するデータの組み毎に離散化してセミバリオグラムを求める。これを実験セミバリオグラム  $\gamma^*(h)$  と呼ぶ。

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (x_i - y_i)^2 \quad (3-9)$$

ここで、 $x_i$  と  $y_i$  は距離  $h \pm \Delta h$  だけ離れた地点に存在するデータであり、 $N(h)$  はその組数である。なお、 $h \pm \Delta h$  の値は対象領域のデータ密度に応じて適宜設定することとし、任意の

距離 $h$ における値を求める。

このセミバリオグラムをクリギング法に取り込むには、離散化したデータがある関数モデルで近似する必要があるが、本研究では次式に示す指数関数モデルを用いた。

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left( 1 - \exp\left(\frac{-3|h|}{a}\right) \right) \quad (3-10)$$

ここで、 $a$ はレンジと呼ばれデータ間の距離がこの値以上になれば互いに無相関となることを示す値である。また、 $C_0$ はナゲットと呼ばれ計測誤差等のデータの不確実性を表す値であり、この値が大きいと推定精度は著しく低下する。そして、 $C_0 + C_1$ はシルと呼ばれ、データ間の距離が $a$ 以上の時にバリオグラムが一定となる収束値であり、それぞれ式(3-9)の結果より最小自乗法を用いて求める。なお、ここでは次式のように式(3-10)を単純化して用いた。

$$\gamma(h) = a \cdot (1 - e^{-b \cdot h}) \quad (3-11)$$

### 3-3 推定精度に関する検討

#### 3-3-1 対象地区

本研究で提案する液状化領域の空間分布推定法の推定精度を検討するため、以下に示す2地区を対象として解析を行った。両地区共に河川下流域の沖積地盤に存在する市街地であり、地震後に液状化による噴砂や亀裂、側方流動や地盤沈下、さらにそれによる構造物被害が多数確認されている地区である<sup>5),6)</sup>。

一方は、1964年新潟地震( $M=7.5$ )により被災した新潟県新潟市の事例である。対象地区は、図3-1示す信濃川とJR新潟駅に挟まれた東西0.6km×南北1.1km×深度20mの領域である。地盤データとしては、対象地区内外に存在する計26本のボーリングデータを用いており、地下水位は全て地表面と仮定している。 $F_L$ 値の算出に用いた新潟市での地表面最大加速度は0.16gである。

他方は、1983年日本海中部地震( $M=7.7$ )により被災した秋田県能代市の事例である。対象地区は、図3-2に示す能代市北部の米代川に面したJR能代駅と砂留山に挟まれた東西1.2km×南北1.6km×深度20mの領域である。図3-2より明らかなように、対象地区内には5本のボーリングデータしか存在しないため、地盤データとしては周辺地域のデータも含めた計20本のデータを用いた。ここでも、地下水位は全て地表面と仮定している。 $F_L$ 値の算出に用いた能代市での地表面最大加速度は、秋田市での最大加速度0.235gを基に、震度分布及び震央からの距離を考慮して0.25gと仮定した。

なお、解析ではこれらの地盤を東西50m×南北50m×深さ1mのブロックに分割し、各ブロック毎に $F_L$ 値の推定を行った。

#### 3-3-2 推定結果

図3-3に深度毎に求めた両地区のバリオグラムの一例を示す。なお、式(3-9)の計算において $h$ と $\Delta h$ は共に50mとした。また、同図には式(3-11)の近似曲線も併せて示してい

る。このバリオグラムを用いて、クリギング法により $F_L$ 値の平面分布の推定値と推定誤差の分散を示したのが図3-4と図3-5である。両地区のバリオグラムを比較すると、新潟市の場合のレンジは2.2、能代市では0.33であり、データ密度の大きい新潟市の方がデータの相関性が高く、推定値や推定誤差の分布形状にもその結果が良く表れている。

つぎに、全データから1点のデータを除外し、残りのデータを用いて除外点の値を推定する作業を全てのデータについて行い、その推定値と除外点の実際の値とを比較した結果が図3-6である。すなわち、これが推定精度を表すものである。前で述べたように新潟市の方がデータの相関性が高く推定誤差も小さいことより、能代市と比較して非常に精度の高い推定が行われていることが分かる。したがって、本手法をデータ密度の低い地盤に適用する場合には、推定結果の取り扱いに十分注意する必要があると言える。

図3-7は深度1m毎に推定した $F_L$ 値の平面分布を重ね合わせ、 $F_L$ 値が1.0以下の領域のみを抽出した結果であり、液状化領域を3次的に表示して南東方向より地盤内を鳥瞰した様子を示している。また、図3-8は、図3-1に示すA-A'及びB-B'の鉛直断面における液状化領域を示したものであり、この様に任意の方向や断面での液状化領域の分布を表示することが可能である。従来の液状化予測では、液状化領域を2次的に評価するに留まっていたが、この手法を用いることにより、分布形状や体積といった3次的な評価も可能であると言える。

$F_L$ 値で液状化の判定を行った場合、特に表層付近の土層に関しては、表土や地下水位の影響によってその判定結果が大きく異なる場合がある。図3-9は新潟市における $N$ 値の3次元分布を同様の手法で求めたものであるが、図3-7(a)では非液状化と判定された北東部の表層地盤が非常に軟弱な地盤であることがこの図から分かる。 $N$ 値は上述の様な影響なしに、地盤の軟弱さを知ることができるため、その推定を行うことによって $F_L$ 値による液状化判定の補足資料になりうるものと考えられる。

### 3-4 1995年兵庫県南部地震におけるケーススタディ

#### 3-4-1 対象地区

1995年兵庫県南部地震 ( $M=7.2$ ) では、臨海部の埋立地盤において広範囲に液状化が発生した。液状化した地域では数メートルに達する地盤沈下や側方流動が発生し、ケーソン岸壁などの護岸構造物に甚大な被害を与えた<sup>7)</sup>。対象地区は神戸市東灘区の埋立地盤である深江浜、魚崎浜、御影浜・住吉浜であり、それらを図3-10に示す。これらの地区は神戸市が1960年から1970年にかけて行った埋立事業で建設されており、埋立材料としてはマサ土が用いられている。これらの地区で得られたボーリングデータの分布を図3-11に示す。

なお $F_L$ 値の算出に用いた地表面最大加速度は、深江浜と魚崎浜を結ぶ東神戸大橋の深江浜側で観測された327.3galを使用した<sup>7)</sup>が、ほとんどの土層で液状化と判定されたため、ここでは、 $F_L$ 値が1.0以下で、かつ $N$ 値が19以下である土層を液状化したものとみなした。液状

化領域の推定法は前節と同様であり，地表面から30mの深さまで推定を行った。

### 3-4-2 推定結果

図3-12から図3-14はそれぞれ深江浜，魚崎浜，御影浜・住吉浜において推定した液状化領域の空間分布である。色のついた部分が液状化領域であり，(a)は南東方向から，(b)は北西方向から眺めた図である。これらの図より，人工島のほぼ全域で地表面から20m以上にもわたって液状化が発生していることが分かり，特に深江浜では他の地区と比べてかなり深い層まで液状化している様子が確認できる。また，何れの地区も液状化層と非液状化層の境界面の形状に特徴があり，層厚の違いや境界面の勾配が視覚的に確認できる。

### 3-5 結語

本章では，液状化領域の空間分布推定法としてクリギング法を用いた手法を提案し，ライフラインの即時被害予測や復旧戦略策定に際しての有効性について検討を行った。

本章で得られた成果をまとめると以下のようなものである。

- (1) 地盤統計手法のひとつであるクリギング法を，液状化領域の空間分布推定に適用することを提案した。
- (2) 対象地域におけるボーリングデータの密度が，その推定精度に大きく影響することを明らかにした。
- (3) 本手法を利用することで，対象地域の任意断面における液状化領域を，2次元または3次的に評価することが可能であることを示した。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説，1990。
- 2) 河出和己・北浦 勝・宮島昌克・吉田雅穂：地盤定数の空間分布を考慮した液状化領域の予測，土木学会中部支部平成4年度研究発表会講演概要集，pp.127-128，1993。
- 3) 吉田雅穂，宮島昌克，北浦 勝：液状化領域の空間分布推定法に関する検討，第29回土質工学研究発表会平成6年度発表講演集，3分冊の2，pp.1047-1048，1994。
- 4) E. H. Isaaks and R. M. Srivastava: An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, 1989.
- 5) M. Hamada: Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines, 1964 Niigata Earthquake, Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes, Vol.1, NCEER-ADEP, 1992.
- 6) M. Hamada: Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines, 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake, Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes, Vol.1, NCEER-ADEP, 1992.

- 7) 濱田政則・磯山龍二・若山加寿江：1995年兵庫県南部地震，液状化、地盤変位及び地盤条件，地震予知総合研究振興会，1995.

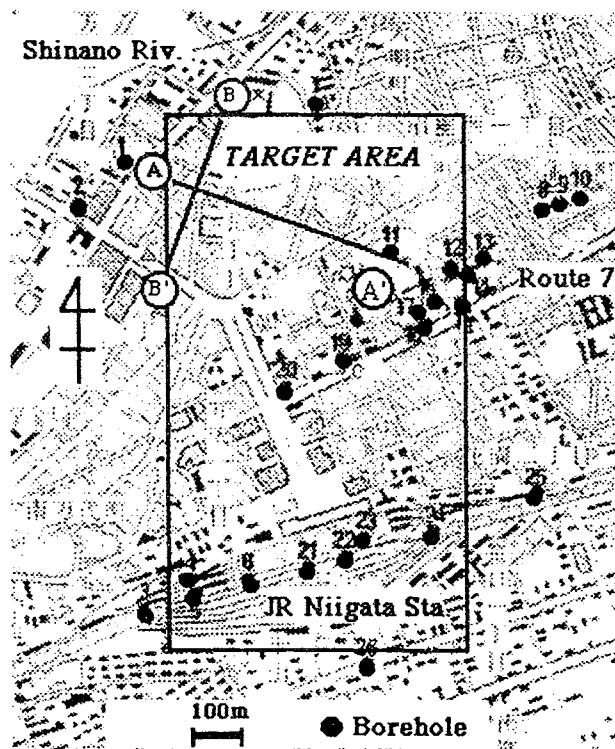


図3-1 新潟市における解析対象地区

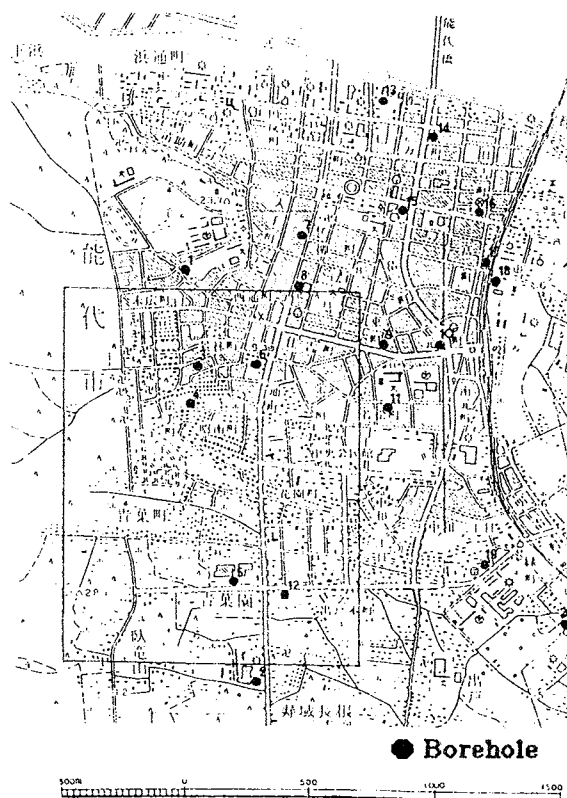
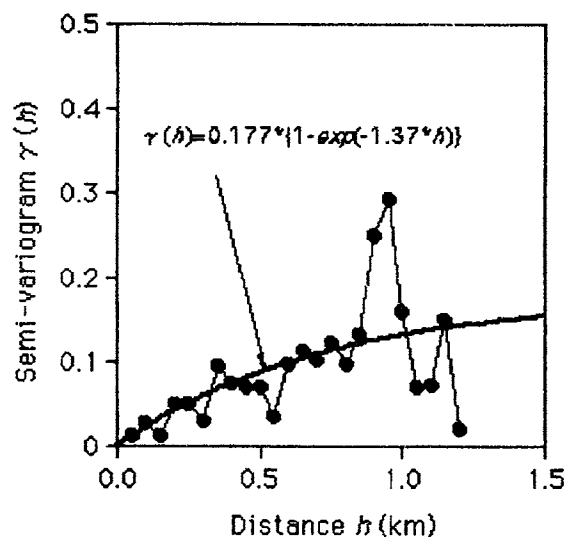
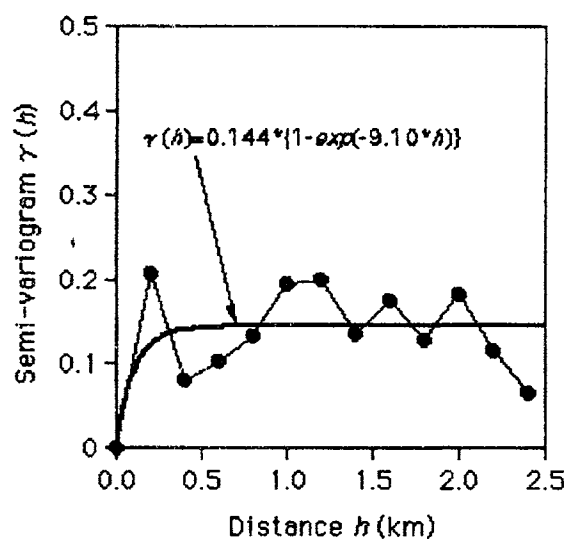


図3-2 能代市における解析対象地区



(a) 新潟市



(b) 能代市

図3-3 セミバリオグラム

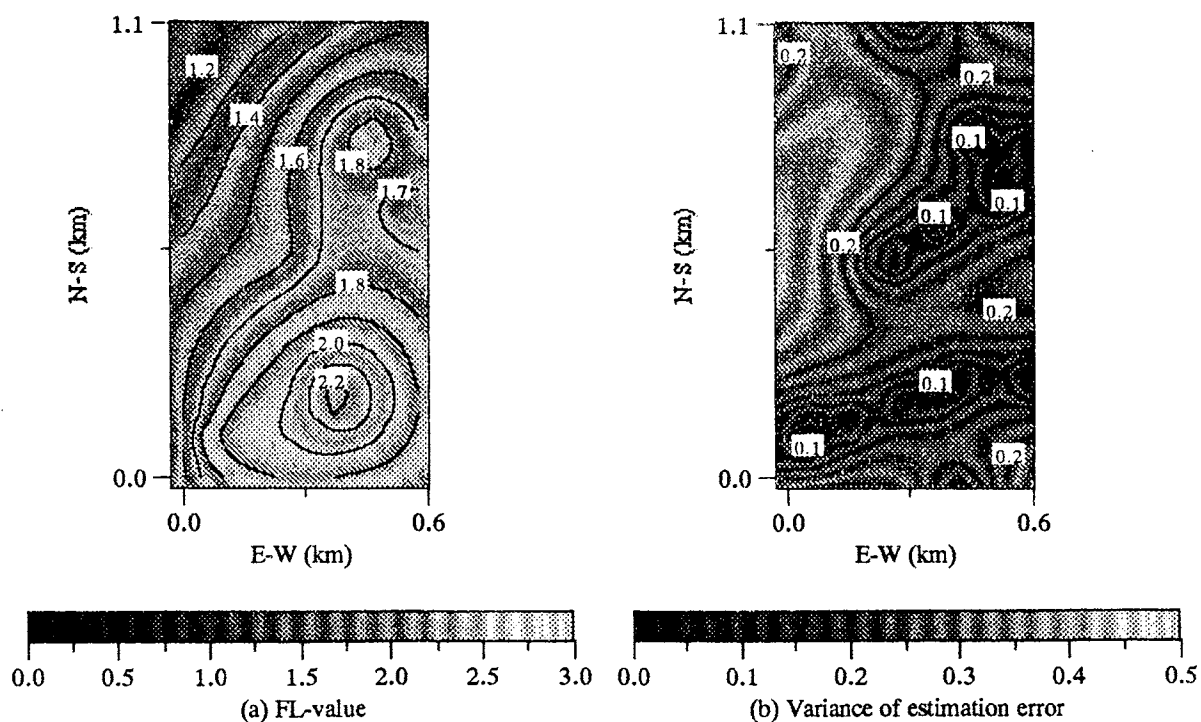


図3-4 新潟市におけるFL値の2次元推定結果

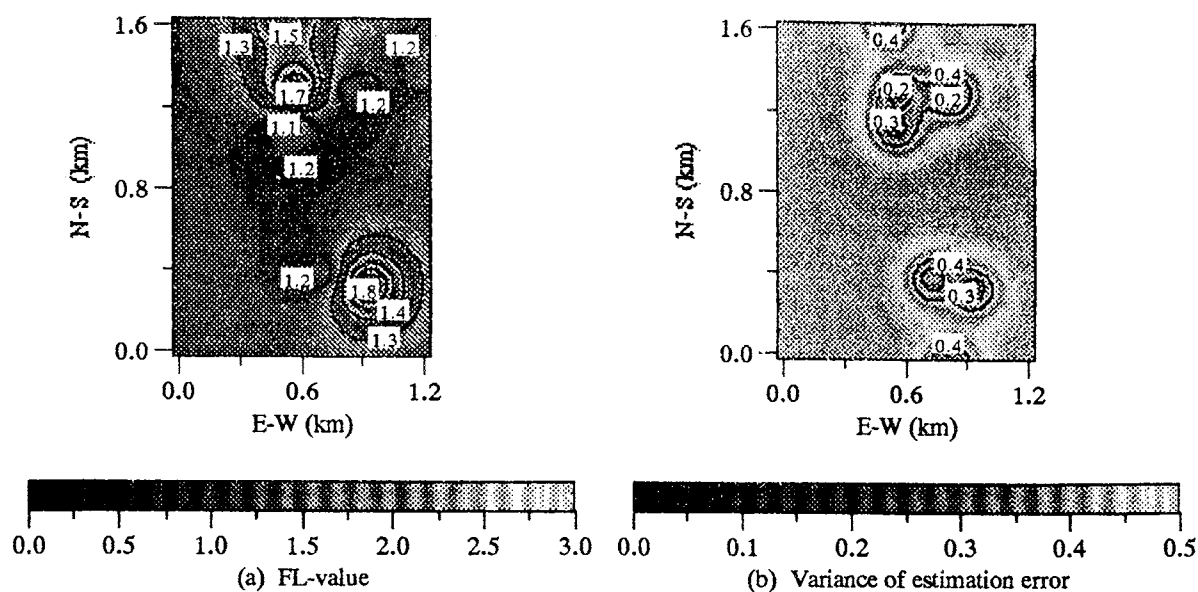


図3-5 能代市における $F_L$ 値の2次元推定結果

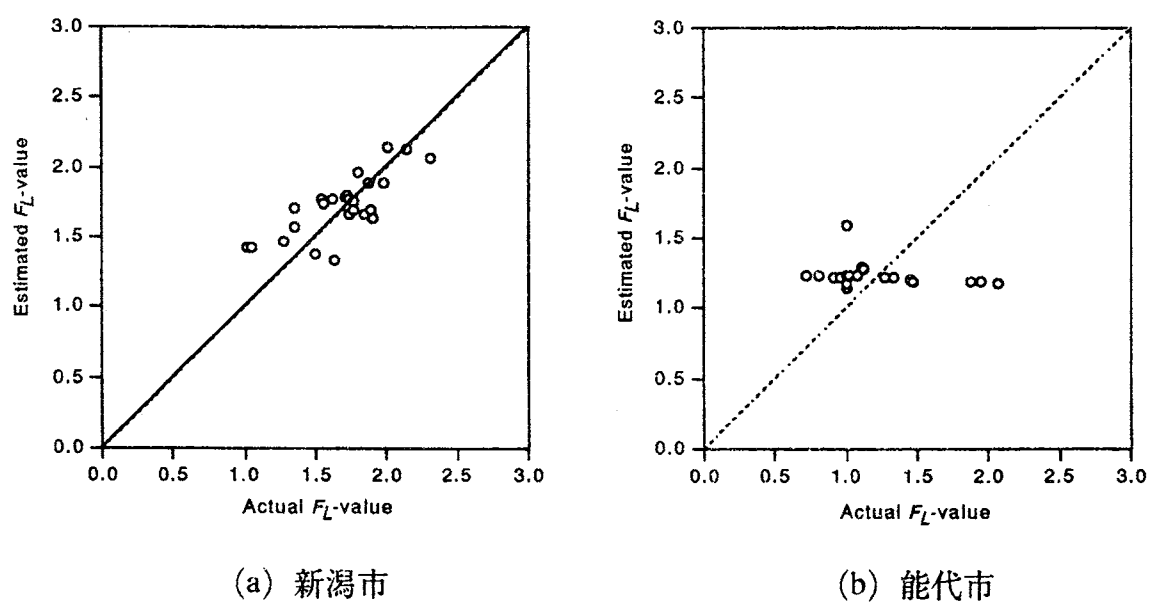
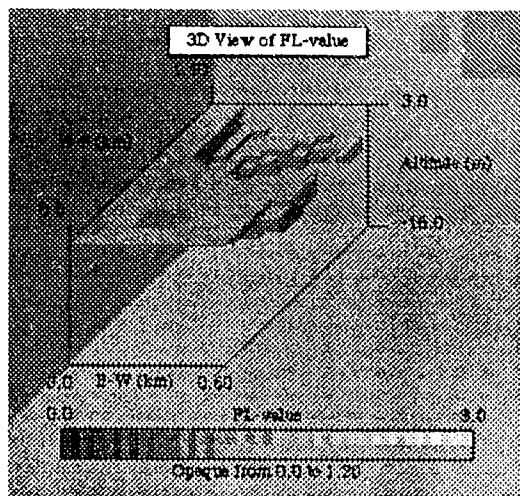
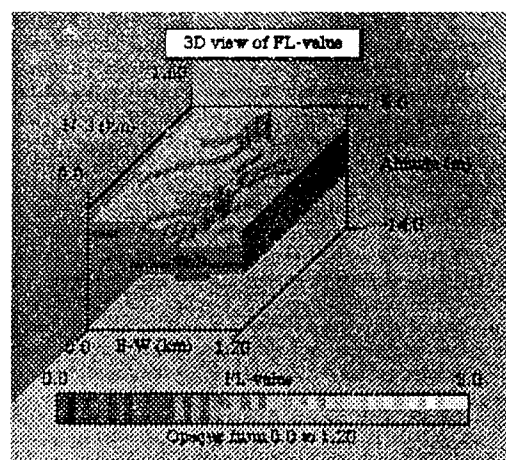


図3-6 推定精度の検証



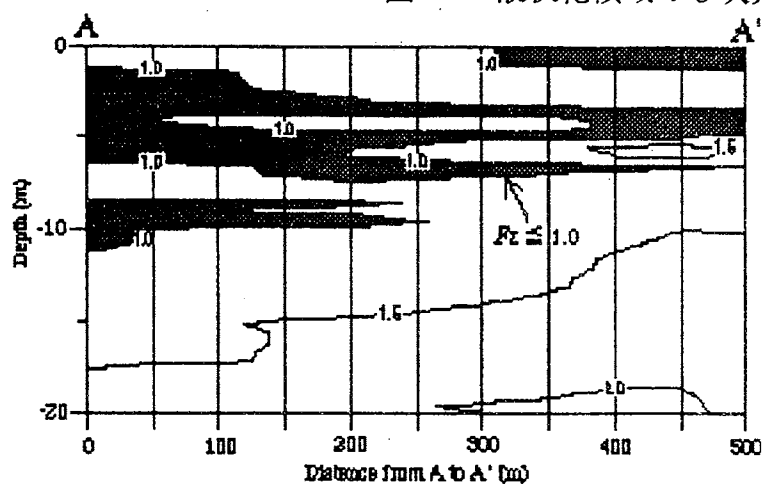


(a) 新潟市

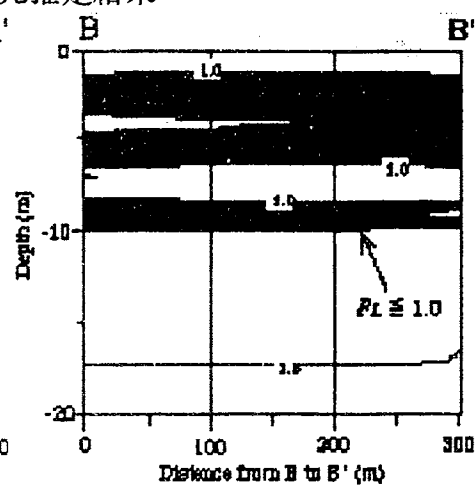


(b) 能代市

図3-7 液状化領域の3次元推定結果

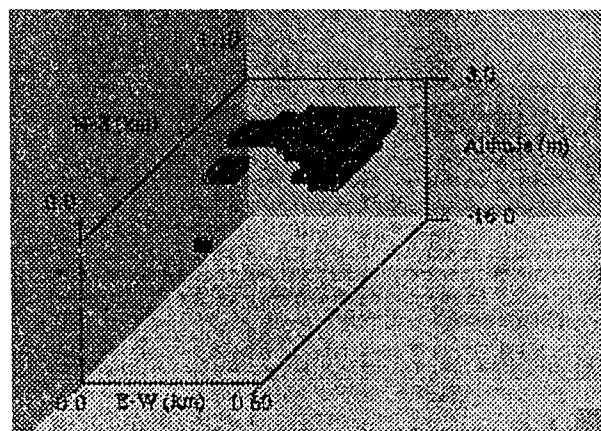


(a) A-A'断面

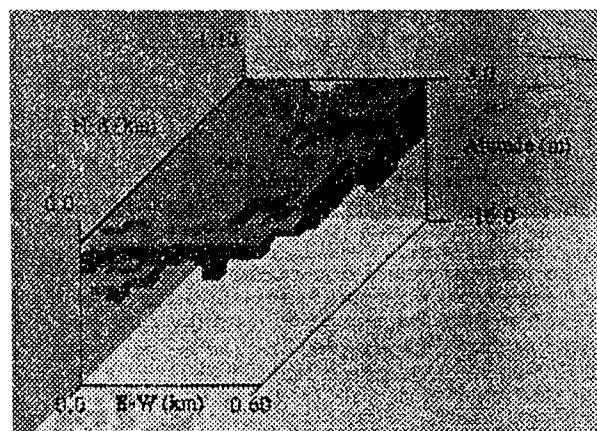


(b) B-B'断面

図3-8 新潟市におけるFL値の2次元推定結果



(a)  $N \leq 5$



(b)  $5 \leq N < 10$

図3-9 新潟市におけるN値の3次元推定結果

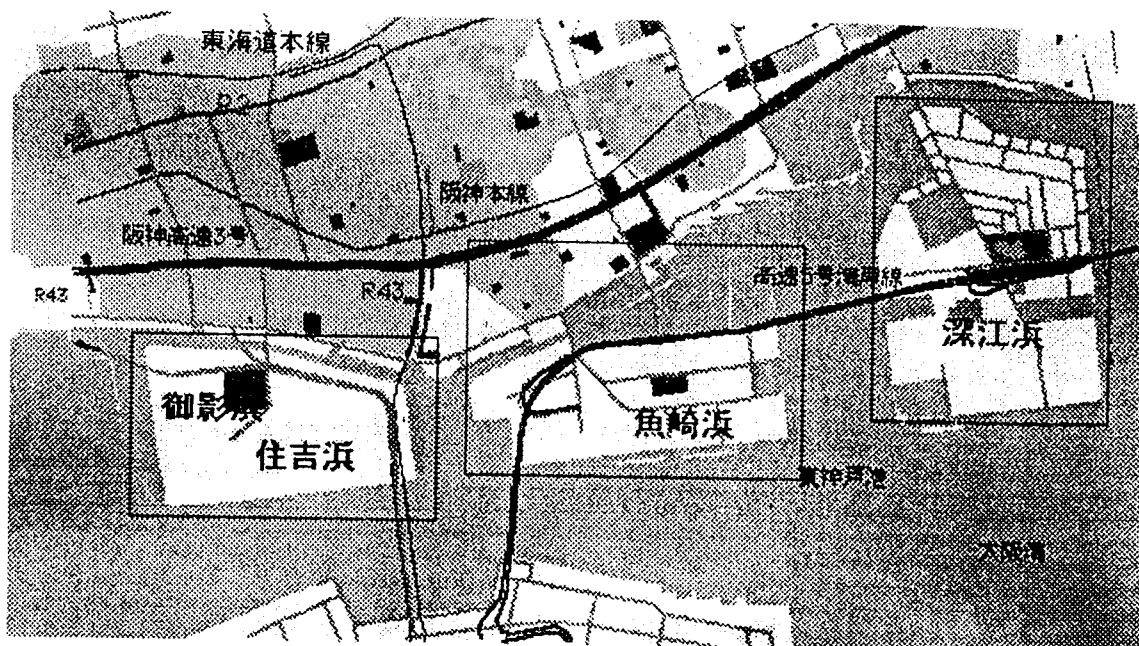
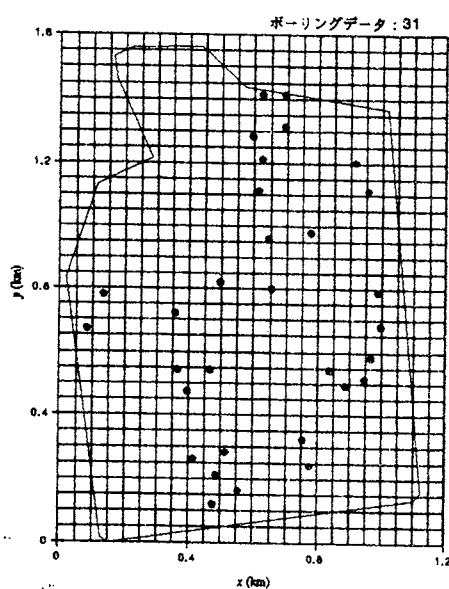
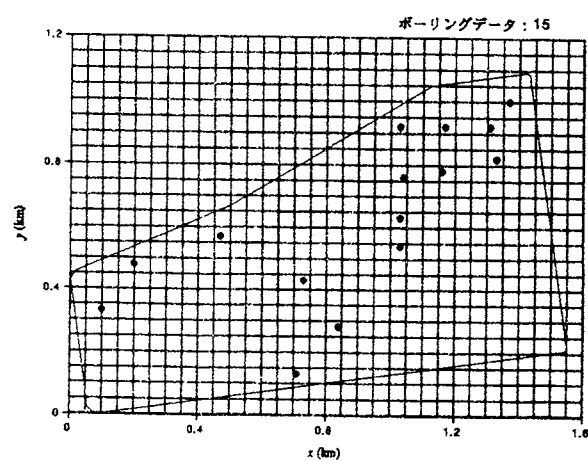


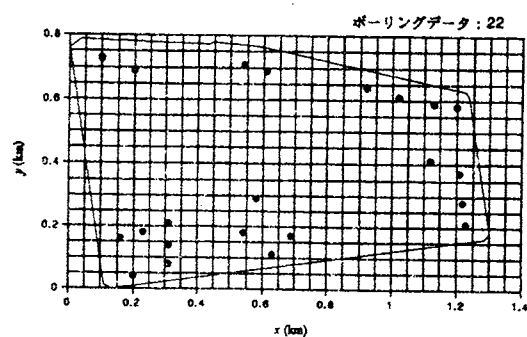
図3-10 神戸市における解析対象地区



(a) 深江浜



(b) 魚崎浜



(c) 御影浜・住吉浜

図3-11 ボーリングデータの分布

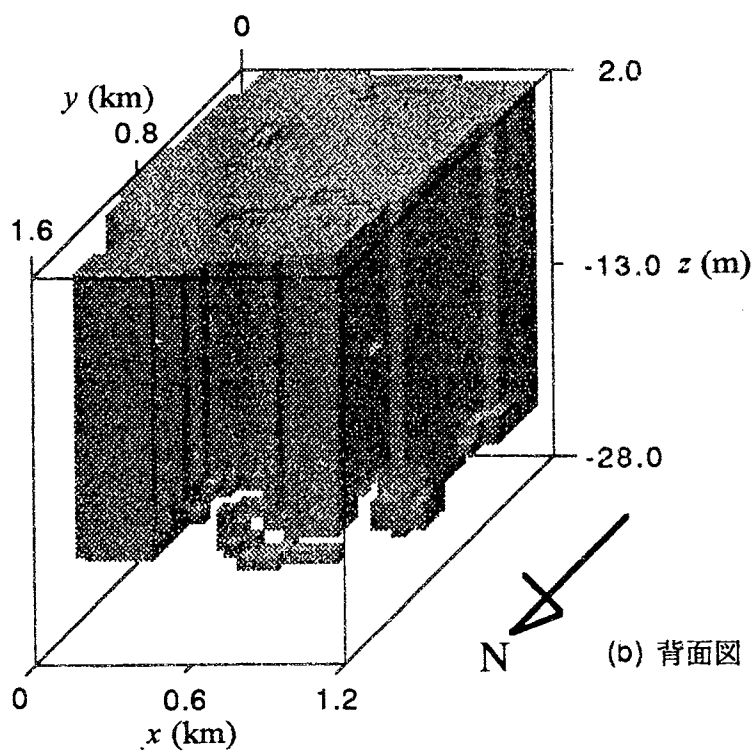
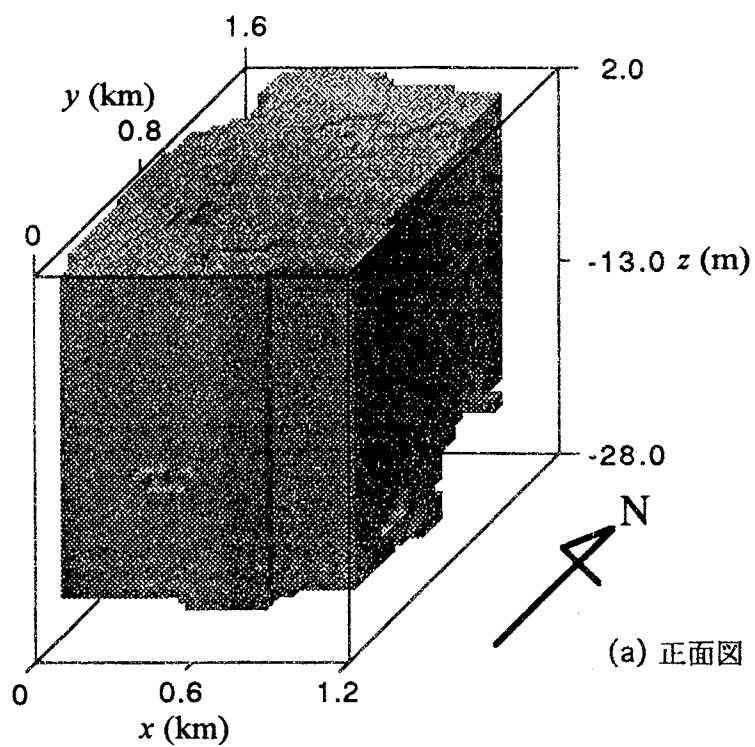


図3-12 深江浜における液状化領域の3次元推定結果

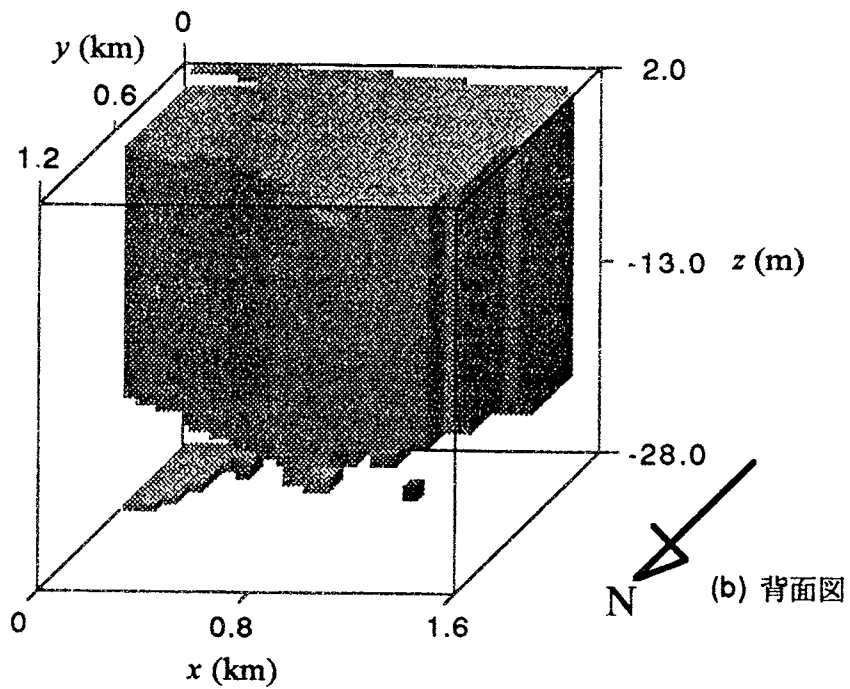
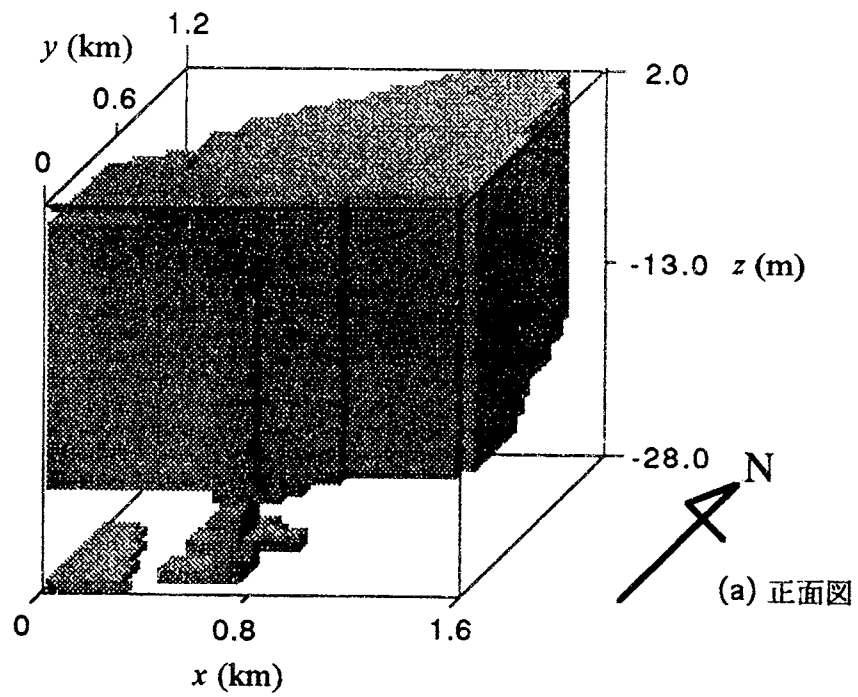


図3-13 魚崎浜における液状化領域の3次元推定結果

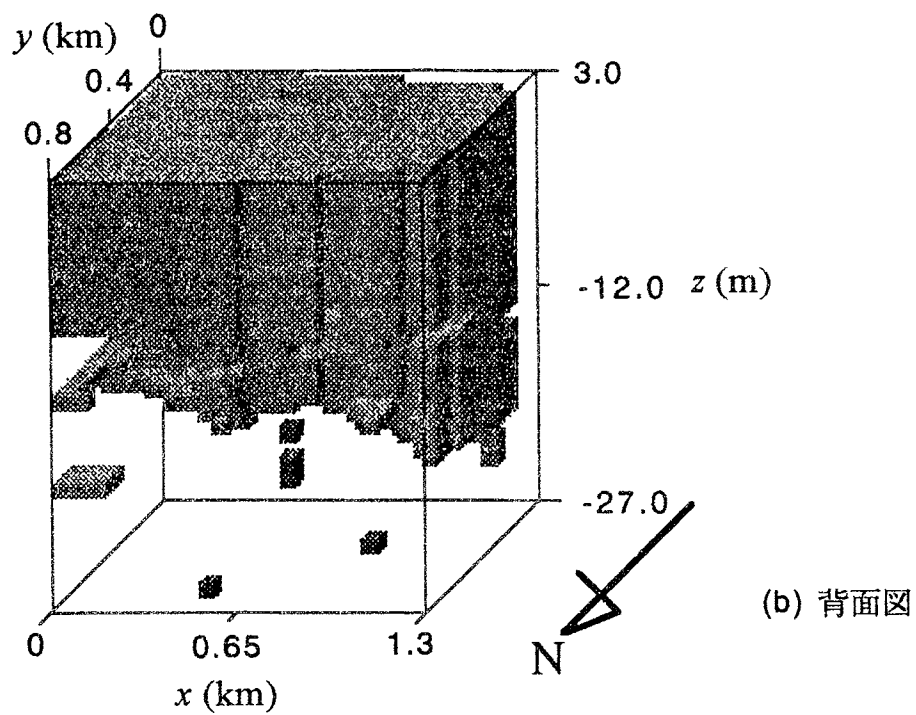
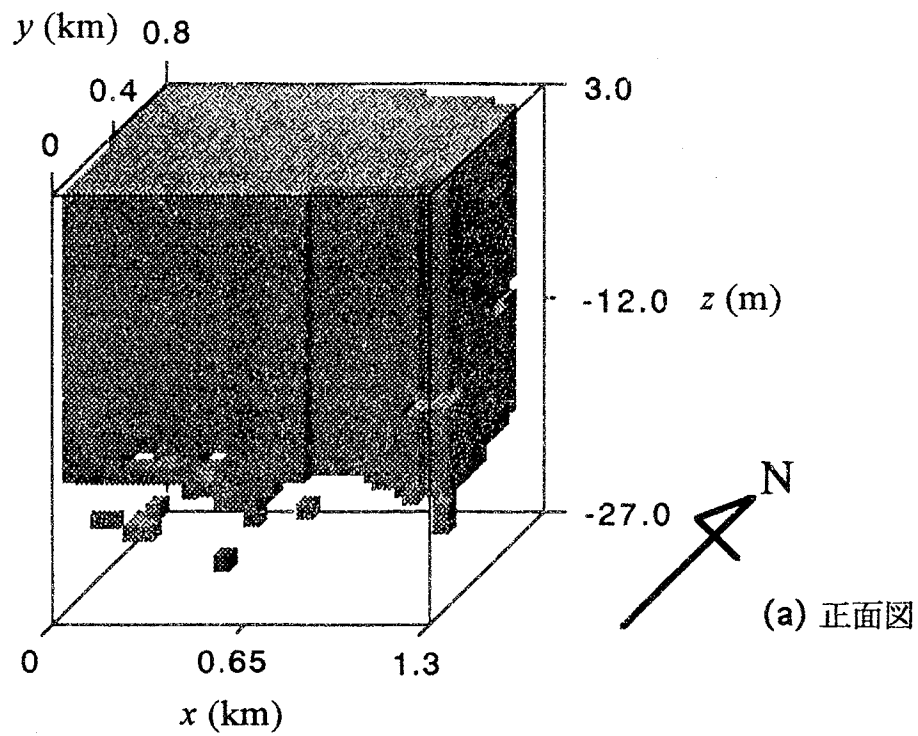


図3-14 御影浜・住吉浜における液状化領域の3次元推定結果

## 第4章 上水道ネットワークの最適モニタリング位置

### 4-1 概 説

現在、上水道ネットワークにおける遠隔監視システムとして、流量計や圧力計で主として配水場において供給状態を監視するシステムがある。これによって、地震時に上水道システムが被害を受けたときなどの大きな異常を把握し、供給を停止するか否かを判断することはできるが、被害箇所を特定することはできないのが現状である。そこで、幹線管路をモニタリングすることによって、ある程度被害状況を把握することができるようになると考えた。このような観点から、最適なモニタリング位置を決定する方法について検討する。

そこで本章では、上水道管路網を構成している管路の材質やネットワーク形状、地盤特性などを考慮して、管路破壊が確率的要因を含んで発生すると考え、モンテカルロ・シミュレーション法を用いて地震時流量解析を行い、管路網のクリティカルポイントを明らかにする。さらに、人口分布や緊急時にも水が不可欠である病院などの防災拠点の位置を考慮し、ネットワーク上における管路の重要度を定義することによる最適モニタリング位置の決定方法を提案する。

### 4-2 上水道ネットワークのモニタリング重要度評価

#### 4-2-1 モンテカルロ・シミュレーション法を用いた地震時の影響度評価

地震時における上水道配水管路網の機能的な信頼性を、確定論的な見地から評価することはかなり難しいことであると考えられる。というのも、第1に、地震の発生自体が確定的ではない。構造物や建築物に甚大な被害をもたらす巨大地震の発生は稀であり、また、その地震記録や震害記録となると、我々に有用な資料となるようなものは数少ない。第2に、配水管路の破壊は、管路の強度、地盤条件、埋設深さなどのばらつきを持つ多くの要因によって影響されている。また、配水管路網をネットワークとして見ると、その機能はそれを構成している耐震性の異なる管路の破壊状況によって複雑に影響されている。管路網は比較的単純な管路が結合して形成されるものではあるが、ネットワークとして見たときの配水管路網は、単純にすべての管路の破壊の影響が同じであったり、破壊の影響が単に伝達することはない。また、シミュレーションを確定論的に行うと、いたずらに回数が増えるだけであるが、モンテカルロ・シミュレーション法のように乱数を与えて実験する方法は、近似解ではあるが効果的に実験回数を少なくして解を得ることができる。

以上のことから、確定論的にすべての場合を実験して解を得るよりも、乱数を用いてランダムな試行を繰り返し、近似解を得る方が有効であると考えられる。そこで本研究では、モンテカルロ・シミュレーション法を用いて、配水管路網が地震時に損傷を受けた場合の

影響度を評価する。この方法では、乱数を用いて十分多数回のランダムな実験を繰り返し、その結果を集計することによって、求める解を近似的に得ようとするものである。

まず、モンテカルロシミュレーション法の適用にあたって重要となる、管路の破壊状況と破壊確率の考え方について述べる。すなわち、管路の破壊を想定するに当たって、想定地震による地震の揺れの強さを設定し、これより管路の被害率を求め、管路の破壊がポアソン過程に従うとして破壊確率を求める。

破壊確率を求める際に必要となる被害率の算出方法をについて以下に示す。埋設管の物理的な被害の程度を統計的に検討する際には、破壊箇所数を管路延長で除した値、すなわち単位長さあたりの破壊箇所数が用いられ、これを被害率と呼んでいる。被害率は次のようないくつかの要因によって左右される。(a) 地盤の種別、(b) 管路の埋設支持状態、(c) 管材質、継手特性、(d) 管径・管厚、及び異形管部の有無、(e) 地震動強度、継続時間、(f) 埋設年代、腐食状況など、である。これらの要因による影響を考慮して、各研究機関や自治体において被害率と最大加速度あるいは最大速度との関係式などが既に提案されている。

つぎに、管路の破壊を定義し、被害率から各管路の大破損、小破損の発生確率を求める方法を述べる。上水道管路の被害は、構造的破損と機能的破損が必ずしも一致しない。構造的破損とは、管体や継手部が物理的に破損を受けることである。機能的破損とは、管体部や継手部が物理的破損を受けることによって、多量の漏水が発生し、水が流れなくなり通水が不能となる状態のことである。本研究では、以下のように管路の破壊を考えることにする。地震による配水管の被害には、管体部での折損による破損、継手部での抜け、突込み、ゆるみによる破損などがある。以上の被害の中でも管体部の折損による破損や継手部での抜けなどの被害は、破損箇所で多量の水が漏水し、その部分より下流には水が流れなくなるので、その管路では通水不能になる可能性が高い。また、管体部での破損でも軽微なものや継手部のゆるみによる被害では、破損箇所で漏水はしているが通水可能な状態であると考えられる。そこで前者を大破壊、後者を小破壊と定義する。

大破壊、小破壊とは、管路の個々の物理的破損を意味しているに過ぎない。しかし、節点と節点とを結ぶ管路における機能的な破損を考えた場合、小破壊が数カ所あっても通水可能であることも考えられる。また、小破壊が多数発生して大破壊と同じように通水不能となることもあり得る。そこで、管路の機能的な破損を考慮したモデルにおける取扱いを次のように定義する。すなわち、大破損を、節点と節点とを結ぶ管路が破壊し通水不能となる状態とする。具体的には、管路に大破壊が1箇所以上発生するか、または、小破壊が $n$ 箇所以上発生した場合とする。管路が大破損を受けた場合、その管路はなくなったものと考え、その両端の節点から漏水係数 $C_1$ なる漏水が発生するものとする。一方、小破損とは節点と節点とを結ぶ管路が破壊を受けて漏水が発生しているが、通水可能な状態とする。具体的には、管路が $n$ 箇所未満の小破損を受けている場合とする。管路が小破損を受けた場合、管路はそのままであるが、両端の節点から漏水係数 $C_2$ なる漏水が発生するものとする。

モンテカルロ・シミュレーション法を用いて地震による破損状態をシミュレートする場合

合、乱数（ただし、0～1までの値をとる）を与え、破損の発生する確率を下回ったときにその管路は破損したものとして流量解析を行う。このとき、大破損、小破損の発生する確率をそれぞれ $P_r$ とする。一般に、地震による管路の破壊はポアソン過程に従うとされている。したがって、それぞれの破壊確率を次式で表すことができる。

$$P_r(B) = \{1 - \exp(-D_p L)\} + \exp(-D_p L) \cdot \left\{1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(D_q L)^k}{k!} \cdot \exp(-D_q L)\right\} \quad (4-1)$$

$$P_r(S) = \exp(-D_p L) \cdot \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(D_q L)^k}{k!} \cdot \exp(-D_q L) \quad (4-2)$$

ここで、 $B$ は大破損が発生する事象、 $S$ は小破損が発生する事象、 $L$ は管路長（km）、 $D_p$ 、 $D_q$ はそれぞれ大破壊、小破壊の被害率（箇所／km）、 $n$ は小破壊が $n$ 箇所以上発生すると大破損になることを表している。本研究では $D_p$ 、 $D_q$ として、ともに被害率を用いることにする。

本研究では、上述の破壊確率を各管路に与え流量解析を行い、各節点において必要な水量を取り出すことができるかを判断し、必要水量を取り出すことができなければ、その節点は、そこに水が流れてくるまでの管路においての地震による破壊の影響を受けているとする。これを多数回のシミュレーションを行い、節点の影響度を求める。これを次式で定義する。

$$R_i = \frac{N'_i}{N} \quad (4-3)$$

ここで $R_i$ は節点 $i$ における影響度、 $N'_i$ は節点 $i$ において必要水量の水を取り出せなかったシミュレーション回数、 $N$ はシミュレーションの回数である。

なお、流量解析にあたっては各節点のエネルギー位を未知数として解析する手法であるエネルギー位法を用いた。これは、各管路の流量を未知数として解析する手法である流量法に比べて、漏水の取り扱いが容易であることによる。

#### 4-2-2 モニタリング位置の重要度評価

まず、上水道管路網におけるモニタリング位置を決める評価指標を設定する。地震によって上水道システムが物理的破壊を受け、システムとしての機能を満たさなくなったとき、断水による影響が大きいものを以下に示し、これらの中で地震発生直後、特に緊急に水が必要となると考えられるものを評価指標として取り上げことにする。地震発生時に断水が起こることによって住民が受ける影響、あるいは緊急対応、復旧活動に及ぼす影響を以下に示す。

##### (a) 飲料水について

地震発生直後の混乱期の数日間においては、被災した住民の生命維持を図ることが最優先となる。水は人が生きていくためになくてはならないものであるため、被災者の生命を守るために、水の確保は最重要事項である。また、被災時に住民は指定の避難所に集まる



ので、避難所への水の供給も重要である。

(b) 医療用水について

地震により多くの建物の倒壊や丘陵、山地などの地盤崩壊、高架橋や堤防などの土木構造物の破壊が生じた場合、それに伴って多くの負傷者が発生する。負傷者の早期治療や手術を行う上では多量の水が必要となる。入院患者や通院患者は、震災時にも継続して医療を受けることが必要である。したがって、医療施設における医療機器やコンピュータの機能を正常に働かせることが生命維持には重要であり、これにも水が必要である。治療に必要な水が確保できなければ医療が停止する事態も考えられる。

(c) 消火用水について

地震時の被害を拡大する要因の一つとして、火災がある。地震発生直後には、ガス管や電線の破壊などによって火災が発生する可能性がある。火災を早期に鎮圧することは、被害の拡大を防ぐために重要な事項であり、火災が発生した地域への迅速な水の供給が必要である。特に、木造建築物が密集している地域では火災が発生しやすく、被害も拡大しやすいので消火用水が多量に必要であると予想される。

(d) 生活用水について

震災直後の混乱期が一段落した段階では、トイレや炊事、洗面、風呂、洗濯用水など現代生活に欠かせない生活用水を供給していくことが必要になる。

(e) 都市・産業活動用水について

都市が震災を受けた場合、社会・経済的な影響を受ける。例えば、現代では都市・産業活動においてコンピュータは必要不可欠のものとなっている。地震による物理的破損によって被害を受ける可能性もあるが、大型コンピュータなどは冷却用の水も必要であるため、水の確保が重要となる。

以上のことより、地震発生直後に水が必要となるのは (a) 生存のための飲料水、(b) 治療のための医療用水、(c) 火災鎮圧のための消火用水であると考えられる。これらのことを考慮して、上水道管路網のモニタリング位置を決定するための評価指標として、各節点で水を取り出す人口（給水人口）、被災時に住民が集まる避難場所、医療機関である病院、木造建築物が密集していて火災が起きやすい地域を選定した。(d) の生活用水については、(a) と関連しており、(e) については各機関で水の備蓄を行っているものと考え、緊急に水が必要になるものではないとし、本研究では評価指標としない。評価指標の対象となるものを表4-1に示す。

本研究では、地震発生に伴って生ずる管路の破壊によって、水を取り出せなくなる影響が大きく、その影響を受ける要因（人口などの評価指標）の多い管路、すなわち、重要度の高い管路をモニタリングすることによって早期復旧、被害拡大の抑制になると考え、最適モニタリング位置を推定するために重要度を以下に示す方法で定義した。

$$[\text{要因影響度}]_{ij} = R_i \times x_{ij} \quad (4-4)$$

$$y_{kj} = \frac{[\text{累計した} [\text{要因影響度}]_{ij}]_k}{[\text{累計した節点数}]_k} \quad (4-5)$$

$i$ : 節点番号

$j$ : 要因 (評価指標) の種類 (人口など)

$R_i$ : 式 (4-3) による, 節点 $i$ での水が流れてこない影響の大きさ

$x_{ij}$ : 節点 $i$ での要因 (評価指標)  $j$ の大きさ

$y_{kj}$ : 各要因 $j$ による管路 $k$ の重要度

〔要因影響度〕 $_{ij}$ : 節点 $i$ での要因 $j$ による影響度の大きさ

〔累計した〔要因影響度〕 $_{ij}$ 〕 $_k$ : 〔要因影響度〕 $_{ij}$ を下流端から上流に遡って累計した管路 $k$ での累計影響度

〔累計した節点数〕 $_k$ : 節点の数を下流端から上流に遡って累計した管路 $k$ での累計節点数

重要度 $y_{kj}$ を求める式 (4-5) については, どの管路において下流側に及ぼしている影響が大きいかを見るために要因影響度を下流端から累計した。ただし, 累計においては, 下流端の節点から上流側の節点に遡って累計した値を節点での累計値とし, 節点の上流側にある管路の累計値をその節点での累計値と同値とする。節点に接続する上流側管路数が複数の場合は, 累計値をその数で除し, それぞれの管路に振り分けるものとする。また, 累計した節点数の多さによる偏りをなくするために, 累計した値を累計した節点数で除し節点数について平均化した。

上水道システムは, 需要者, すなわち住民一人一人に清浄な水を配水することが本来の機能である。地震時にシステムが損傷を受け, 機能的破損を受けたときにもできるだけ早く破損箇所を修繕して, 住民に清浄な水を配水するという本来の機能を回復する必要がある。しかし, 地震時に緊急に必要となる医療用水や消火用水などは行政担当者のそれぞれの役割によって重要と考えるものが違ってくるものである。そこで本研究では, モニタリング位置を決定するために, まずそれぞれの評価指標を対象として, 数値化した重要度を別々に評価し, つぎに, 総合的に見たときの重要度を評価することにする。

式 (4-5) で得られる対象とした評価指標ごとの重要度 ( $y_{kj}$ ) に, 被害を受ける可能性の高い, すなわち被害率の高い管路をモニタリングすることによって早期復旧, 被害拡大の抑制につながるという観点から $y_{kj}$ に管路 $k$ の被害率 $D_k$  (箇所/km) を掛けて $y'_{kj}$ とする。評価指標による重要度は単位も大きさも異なるので, 無次元化してオーダーをそろえるために, 管路 $k$ の重要度 ( $y_{kj}$ ) をそれぞれの指標ごとの最大値で除し, 全指標の最大値を1とした。

$$y'_{kj} = y_{kj} \times D_k \quad (4-6)$$

$$Y_{kj} = \frac{\text{管路}k\text{での評価指標}j\text{による重要度}}{\text{MAX}[\text{管路}k\text{での評価指標}j\text{による重要度}]} = \frac{y'_{kj}}{\text{MAX}[y'_{kj}]} \quad (4-7)$$

$$(0 \leq Y_{kj} \leq 1)$$

上水道管路網の重要度評価によって得られる結果を用いて、管路を重要度別にランク分けをする。ランク分けの基準には、各管路の重要度の相互の量的関係を配慮するという観点から、対象とする全管路の重要度 $Y_{kj}$ の平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ を用いることにする。すなわち、総合的に重要度を評価する際に、一評価指標の重要度の値が大きくなったときに、その評価指標の値の大きさだけで総合的な重要度が高くなることもあり、全指標に対する重要度が同等に評価されなくなるので、全指標を均一に評価するために、式(4-7)で得られた重要度( $Y_{kj}$ )を平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ を用いて5段階のランク分けを用いてマトリクス表示することで全指標の重要度の評価を均一化し同等のものとする。ランク分けの基準は以下のようなものである。

- ランクA：管路重要度( $Y_{kj}$ )が  $(\mu + \sigma \times 2) < Y_{kj}$   
 ランクB：管路重要度( $Y_{kj}$ )が  $(\mu + \sigma) < Y_{kj} \leq (\mu + \sigma \times 2)$   
 ランクC：管路重要度( $Y_{kj}$ )が  $(\mu) < Y_{kj} \leq (\mu + \sigma)$   
 ランクD：管路重要度( $Y_{kj}$ )が  $0 < Y_{kj} \leq (\mu)$   
 ランクE：管路重要度( $Y_{kj}$ )が  $Y_{kj} = 0$

ランク分けによるマトリクス表示を表4-2に示す。

つぎに、各評価指標による重要度を総合的に評価する。前述したのようにして得られた管路 $k$ における指標 $j$ の $r_{kj}$ の $j$ についての和をとり、以下の式のようにして総合的なモニタリング位置の重要度評価を行う。

$$R_k = \sum_j r_{kj} \quad (4-8)$$

### 4-3 金沢市におけるケーススタディ

#### 4-3-1 金沢市上水道管路網のモデル化

前節では、上水道管路網における最適モニタリング位置を決定する方法の一つとして、重要度を定義し、その評価方法を提案した。本節では、金沢市の上水道管路網を対象として重要度評価法のケーススタディを行う。すなわち、金沢市に起こりうる地震を想定し、金沢市の上水道管路網において重要度評価を行い、最適モニタリング位置を推定する。

本研究で対象としたのは、金沢市の計画給水区域における幹線配水本管( $\phi = 300\text{mm}$ 以上)である。上水道幹線配水本管は、金沢市全域に清浄な水を配水する大動脈的役割を果たしている管路で、大地震時においても平常通りに機能することが望まれており、万が一破損を受けてもいち早く復旧対策をとる必要がある。したがって、幹線配水本管においてモニタリングを行うことが重要であると考えられる。

そこで、金沢市上水道幹線配水本管<sup>1)</sup>をノードとリンクによってモデル化した。モデル化した図を図4-1に示す。ここでは、主に管路が交差する地点でリンクの分割を行った。○はノード（節点）、□は配水場、→はリンク（管路）を示している。野田、大桑、館山、浅野川、犀川、若松、四十万高区、四十万中の8ヶ所の配水場より自然流下方式で給水しているが、市内への配水は主に3系統の地域より行われている。野田、大桑、館山、浅野川の4配水場は犀川の表流水を水源として末浄水場より送水され、主として市内の寺町、小立野の高台および田上方面に給水している。犀川、若松の2配水場は内川ダムを水源として犀川浄水場より送水され、主として市内中央部および浅野川以北の地区に給水している。四十万高区、四十万中の2配水場は県営水道を受水し、主として市内南部地区に給水している<sup>2)</sup>。ノード数が77、リンク数が107であり、ノード番号70～77が配水場である。モデル化にあたっては、全てのノードにおいて水の取り出しが行われるものとし、ノード付近の人口をそのノードの給水人口とする。漏水も全てノードで発生するものとする。

#### 4-3-2 流量解析に必要な諸量

流量解析<sup>3)</sup>に必要な諸量を以下に示す。表4-3にノード条件である地盤高、管中心高、需要水量、許容取り出し水量、給水人口、1人1日3リットルに相当する必要水量を示す。管中心高は管埋設深さを2mとし地盤高より求めている。需要水量と許容取り出し水量は、それぞれ金沢市の1996年現在の1日平均配水量と1日最大配水量<sup>2)</sup>を各ノードの給水人口<sup>4)</sup>に基づいて比例配分して求めている。

解析時の初期仮定エネルギー値を全てのノードについて $E_i=100$  (m) とする。また、流速係数 $C_H$ は全てのリンクについて $C_H=50$  とする。漏水項については、全てのノードについて $\kappa=1.15$ 、 $C_i=5.0 \times 10^{-5}$  とする。この値を用いると金沢市上水道の平常時の漏水量は、配水量の約10%となる。また、大破損時の漏水係数を $C_i=1.0 \times 10^{-3}$ 、小破損時の漏水係数を $C_i=5.0 \times 10^{-4}$ 、許容地盤上残存水頭を $RP_d=15$  (m) とする。エネルギー位を指定したノードとそのエネルギー位については、各配水場においてそのH.W.LとL.W.Lの平均値を用いる。表4-4にこれを示す。表4-5に、リンク条件であるリンクの上流側および下流側のノード、管径、管路長を示す。

管路の破壊確率の評価にあたっては、金沢市をほぼ北東から南西に横切る形で存在する森本断層を想定地震断層とした。森本断層は長さ14km、断層上面までの平均的な深さが3kmと推定されており、マグニチュード6.7の地震を想定した。国土庁防災マニュアルの手法<sup>5)</sup>を用いて地表面最大加速度を求め、片山・久保の式<sup>6)</sup>を用いて管路の被害率を算出した。

#### 4-3-3 評価指標の設定

重要度評価法を金沢市に適用するにあたって、地震時に緊急に水が必要となる人口や防災拠点などの評価指標を設定する必要がある。評価指標として、病人、負傷者を治療するための医療用水が必要となる病院、木造建築物が密集し、消火活動の困難性と延焼拡大の危険性の高い区域で特別の消防対策が必要とされている区域、災害時に住民が避難する避

難場所、を対象とする。なお病院については、個人の小規模病院から国立病院のような大規模病院まで大小さまざまな病院が存在しているが、災害時に確実に機能を果たすことが期待されている公的な病院を対象とした。これらの評価指標に関連する病院の病床数、指定避難所面積、特別消防区域世帯数を、金沢市地域防災計画<sup>7)</sup>から抜粋して表4-6～表4-8に示すとともに、各ノードの評価指標値を表4-9に示す。

#### 4-3-4 金沢市における重要度評価

金沢市の上水道幹線配水本管を対象として重要度評価法のケーススタディを行う。適用に当たって以下の資料を収集した。上水道関係では、上水道管路網図<sup>1)</sup>、給水状況<sup>2)</sup>など、人口は金沢市の情報統計課資料<sup>4)</sup>より人口を、金沢市の防災計画<sup>7)</sup>より病院・特別消防区域世帯数・避難所面積を、地盤関係としては、金沢市のボーリングデータ、地盤図<sup>8)</sup>などの資料を収集整理し、解析に用いた。

まず、金沢市上水道配水管路網について、地震時における流量解析<sup>3)</sup>をモンテカルロ・シミュレーション法を用いて行い、水の取り出せない程度、すなわち、影響度の評価を行った。図4-2、図4-3は、金沢市の下に存在すると考えられている森本断層が活動した場合を想定し、管路特性、地盤特性、管路網のネットワーク特性などを考慮して流量解析を行った結果である。同図における影響度のランクは、前述したように全ノードの影響度の平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ を用い、影響度が $\mu + \sigma \times 2$ 以上の場合をランクAとし、 $\mu + \sigma$ 以上 $\mu + \sigma \times 2$ より小さい場合をランクB、 $\mu + \sigma$ より小さい場合をランクC、 $\mu$ より小さい場合をランクDとした。

同図によれば、地震時においては上水道管路網の末端ノードにおいて水が流れてこない可能性が高い、すなわち、影響度が高いランクAとなっている。上水道管路網において末端ノードのランクがAとなったのは、上水道は自然流下方式で全給水区域に配水しているため、配水場より遠い位置のノードは水が供給されにくくなるためである。すなわち、末端付近のノードは、上流側で管路が破損し漏水が発生すると水圧が下がり、水が流れてくる可能性が低くなることが1つの原因であると考えられる。また、末端付近のノードは上流側の1つのリンクに依存しているため、このリンクが破損した場合に水が流れてこなくなると考えられる。これに対し、金沢市の中央部や上流側は、管路網のネットワークがループを形成しており、1箇所のリンクが破損しても別ルートからの水の供給が可能であるため比較的安定した水の供給がなされていると考えられる。一般に管の口径が小さいほど被害を受ける可能性は大きくなるが、下流地域においては管径が小さなものを用いられていることも影響度が高くなっている1つの原因であると考えられる。

石川県地盤図集<sup>8)</sup>によれば、JRより北西地域は河川の氾濫により形成された沖積地で形成されており、N値50以上の基盤が北西（日本海側）にいくほど深い位置にあるので、地表面は比較的軟弱な地盤であるといえ、液状化危険度は高いと考えられる。ボーリングデータより管路が埋設されている地盤の液状化指数 $P_L$ 値を算出すると、JRより北西地域の液状化危険度はかなり高い。一般に、埋設管路は埋設地盤の液状化によって破損を受ける可能性が高いので、その影響で北西地域のリンクの被害率が高なり、北西地域で水の流れ

てこなくなる影響度が大きくなっていると考えられる。

ノードに水を供給する上流側のリンクが1つであるノードや末端ノードの影響度が高くなることは前述したが、ノード6はリンク8の1つのリンクに依存しているにもかかわらず影響度のランクは低くなっている。これは、リンク8の管路は比較的強固な地盤である小立野台地に埋設されているため、管路の破損する確率が低くなっているためと考えられる。

JR付近の北西側と南東側を比較すると、町の中心部である南東側の地域で影響度が高くなっている。これは、金沢市は主にノード番号70の配水場からの配水、71～74方面からの配水、76、77からの配水と3系統からの配水によって市内全域に配水されているが、JRより北西の地域はこの3系統すべてに依存しているため、3系統のうち1系統が残っていれば被害を受けた場合でも機能低下が最小限に抑えることができ、影響度は比較的低くなる。これに対して南東の地域は、主に71～74方面からの配水の1系統だけに依存しているために、この系統が破損を受けて水が供給されなくなると、他系統で代替ができなくなるため影響度のランクが高くなっていると考えられる。

以上のことより、金沢市では下流地域の方が管路網が破損する可能性が高く、上流地域では機能低下の可能性は小さく、配水場で供給を監視していることも考えると、上流地域よりも下流地域においてモニタリングが必要であると考えられる。

#### 4-3-5 各評価指標を用いたモニタリング位置の考察

上水道管路網における、最適なモニタリング位置を人口分布、病院の位置、指定避難所の位置、特別消防区域に指定されている区域などの評価指標を考慮し、リンクの重要度を数値化して推定した評価指標別の重要度について考察する。図4-4～4-11にそれぞれの評価指標についての重要度評価の結果を示す。

人口分布を評価指標として考慮した重要度評価結果を図4-4、図4-5に示す。重要度がランクAとなったのは主に末端付近のリンクである。金沢市の人口分布は、市の中心部（金沢駅の南東の商業地域）以外、市の全域に人口集中地域が点在しているが、重要度の高いリンクはJRより北西地域に見られる。これは、上流地域や市の中心地域では人口集中地域が隣接しているため管路網がループ化されていること、3系統の配水経路より配水されているため1系統が破損しても他の系統より配水することができること、上流地域は比較的地盤がよく、また口径の比較的大きい管が使われていること、などの理由により上水道システムの破損の影響度が低いため、上流地域では人口が集中していても影響人口が小さくなり、リンクの重要度が低くなっていると考えられる。これに対し、下流地域においては、人口集中地域が点となって分布しているため、1つのリンクに依存する可能性が高くなり、そのリンクの破損による影響が人口集中地域に現れ、そのノードの上流側のリンクの重要度が高くなっていると考えられる。以上のことより、人口分布を考慮した重要度評価結果によれば、最もモニタリングすべきであると考えられるリンクは55であると考えられる。

病院の位置を考慮したリンクの重要度を図4-6、図4-7に示す。対象とした病院は、地震時においても確実に機能を果たさなければならない公的な病院であり、病床数で病院の重

要度を表した。モデル化した管路網上では、ノード番号6, 8, 10, 21, 25, 56, 65の位置にそれらの病院が存在している。同図より、6, 21, 65の上流側リンクで重要度が高くなっていることがわかる。これらのノードは上流側の1つのリンクに依存しているためリンクの重要度が高くなっていると考えられる。また、リンク8は比較的地盤のよい小立野台地上にあるため影響度が低いにもかかわらず重要度が高くなっているのは、ノード6には規模の大きな国立病院と金沢大学付属病院が存在するためであると考えられる。リンク68, 62で重要度が高くなっているのは、リンクの受け持つ重要度は2方向に分散されているが、ノード65の病院の存在の影響が大きく現れているものと考えられる。また、ノード21の上流側のリンク37において重要度が比較的高くなっているのは、1つのリンクに依存していることと地盤が比較的軟弱であるために破損する可能性が高いことが原因であると考えられる。これらのことから、病院位置を考慮した際の最適なモニタリング位置と考えられるのは8または63であると考えられる。

避難所の位置を考慮に入れた重要度評価結果を図4-8, 図4-9に示す。避難所として、金沢市の防災計画によって指定されている指定避難所を対象とし、避難所の面積を評価指標とした。その結果、面積の広い避難所が存在しているノード（例えば、ノード45の中央卸売市場、ノード12の総合運動公園）の上流側リンクで重要度が高くなった。

特別消防対策区域の木造建築物世帯数を考慮した重要度評価結果を図4-10, 図4-11に示す。金沢市は非戦災都市であるという歴史的な条件から、市中心部を主として多くの木造建築物が残っている。地震時に火災の発生する可能性の高い地域は市中心部に点在しているが、市中心部は管路網のループ化が整備されているため影響度は小さく、モニタリングの必要性は薄いと考えられるが、重要度も小さく評価されており、良い対応を示している。これに対し、ノード40, 51は末端付近の節点であり管路破損の影響が大きく、水が流れてこないと消火活動に支障をきたすので、モニタリングすることが重要であると考えられる。ノード52の上流側リンクにおいて重要度が高くなっているのは、木造建築物が最も集中している地域であるからと考えられる。地震時には大規模な火災が発生する可能性は高いので、木造建築物が密集している地域に消火用水が供給されているか否かを知ることは極めて重要である。

#### 4-3-6 総合評価によるモニタリング位置の考察

前節では、各評価指標ごとによるリンクの重要度評価を行い、一評価指標のみを用いた場合の最適なモニタリング位置を推定した。

人口分布と防災拠点の位置（病院の位置、避難所の位置、特別消防区域）を総合的に考慮した管路網の重要度評価の結果を図4-12, 図4-13に示す。図4-13によれば、重要度が高くなっているリンクがJRより北西地域に集中していることがわかる。これは、地震時には管路網の破壊の影響が下流側になるほど蓄積されて、下流側ノードになるほど水が取り出せにくくなるためである。また金沢市では、下流地域は地盤が軟弱であるため管路網が破損しやすいということに加えて、管相互の連絡によるループシステムが上流側ほど整備されておらず、1つのリンクの破損の影響が大きくなるため下流側地域における影響度が

高くなるものと考えられる。さらに、JRより北西地域には人口が集中し、戦前からの町並みの残る木造建築物も集中し、指定避難所がいくつか見られる金石地区がノード40にあるため、リンク55、57の重要度が高くなっている。リンク52、54、58、61では、ノード65に県立病院が存在する影響も加わって重要度が高くなったものと考えられる。JRより南東地域における比較的上流地域で重要度が高くなったのはリンク27、74、93である。リンク27の重要度が高くなったのは、ノード12に指定避難所で面積の広い総合運動公園が存在するためである。また、この地域の付近には人口集中地域があり、地震時にはこれらの地域の住民が避難してくると考えられるので、重要度が高くなっている。しかし、病院や特別消防区域などは存在していない。これに対して、リンク74、93では評価した4指標すべてを含む重要度によって高い値を示している。

このように、いくつかの評価指標だけによって重要と評価されるのを避けるために、評価対象とした4指標全てが重要と評価されるリンクのみを対象とした重要度評価の結果を図4-14、図4-15に示す。重要度がランクAとなっているのは、ノード39につながるリンク54、61、ノード43につながるリンク52、58である。表4-9によれば、ノード39と43では明らかにノード39の方が人口も多く、避難所も存在しているので、上水道の機能低下の影響を考慮する場合にはリンク54、61においてモニタリングされるべきであり、また、リンク52、58は隣接するリンクであるリンク54をモニタリングすることで代替されるものと考えられる。このリンクをモニタリングすることによって下流域の上水道の被害状況を概ね把握できるものと考えられる。この2つのリンクのどちらがよいかという判断はこれだけからはできないので、これに関する評価方法の検討が必要である。

つぎに、重要度の高いランクBとなっているのはリンク27、59、60、71、74、93、102である。リンク59、60、71、102は隣接しあったリンクであるが、モニタリング位置としては、102を採用するのが適当であると考えられる。これは59、60、71はループ化によって配水管網がブロック化されている中のリンクであるが、102は他のリンクより上流側にあり、このリンクをモニタリング位置とするとブロック化されている下流域の機能低下の被害状況を概ね把握できるものと考えられるからである。リンク27については、図4-2、図4-3より水の供給されない可能性は低いため、結果で現れたほどモニタリング位置としての重要度は高くないと考えられる。

リンク93は、金沢市の商業地域である配水管網がループ化されており、配水経路がブロック化されているため、このブロック化された地域の被害状況を把握する最も適当なリンクであると考えられる。

金沢市の浅野川より北東地域は比較的大きな配水管網のループ化によるブロックシステムになっているので、このブロックに水を供給している上流側であるリンク74をモニタリングすることで概ねの被害状況を把握できると考えられる。

以上のことより、本研究で得られた結果より最適なモニタリング位置であると考えられるのはリンク54、61、74、93、102であると考えられる。



#### 4-4 結 語

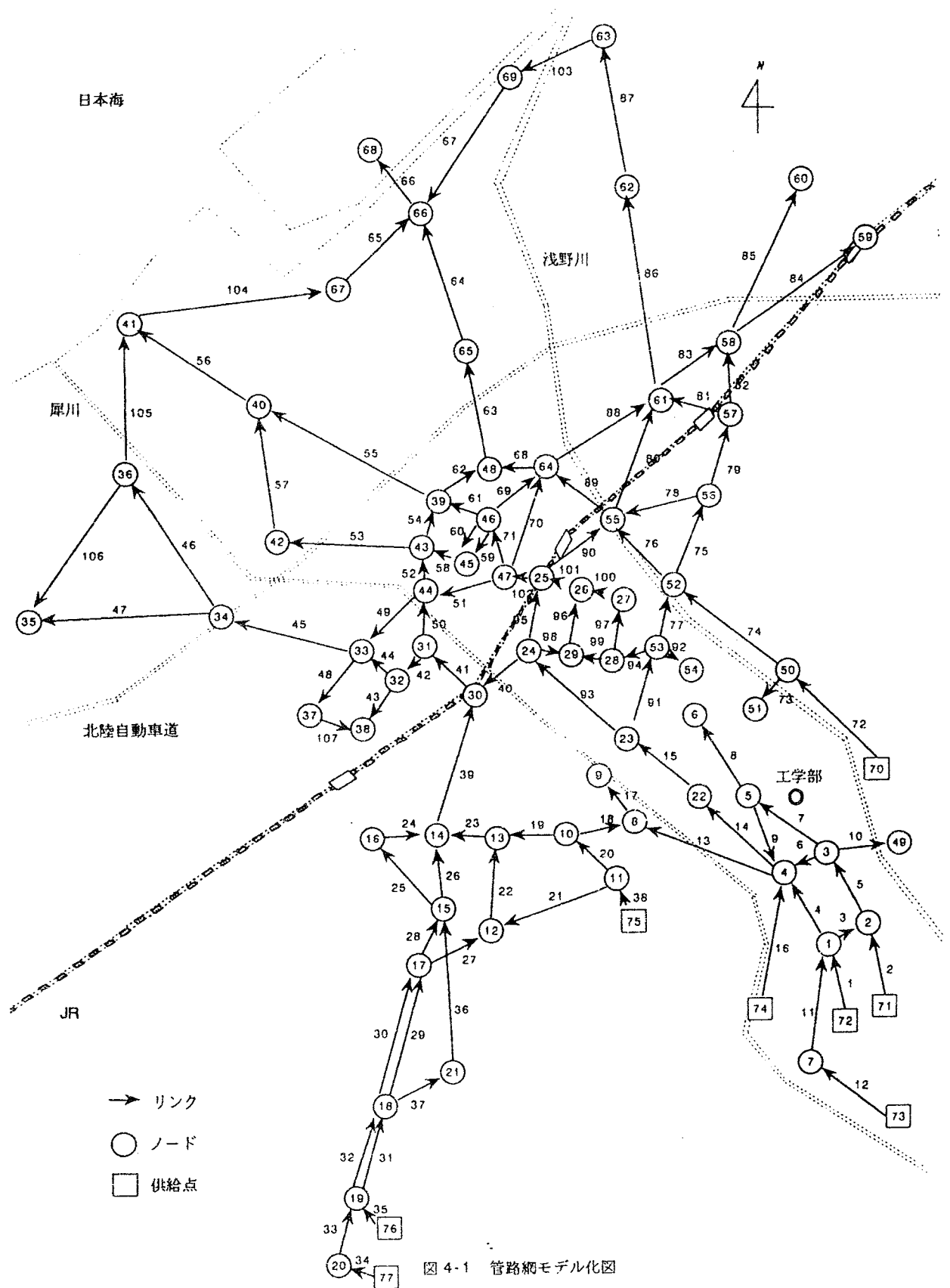
本章では、広範囲に広がる上水道配水管路網において、地震発生直後に的確に被害状況を把握し、緊急対応や応急復旧活動に必要な情報が迅速に収集できるようなモニタリングシステムを設置する場所を推定した。地震時流量解析を行い管路網のクリティカルポイントを明らかにした後、断水・減水が与える影響と人口分布、防災拠点の位置などを考慮して決定するために、ネットワーク上における管路の重要度を定義し、これによって最適モニタリング位置の重要度を評価する手法を提案した。

本章で得られた成果をまとめると以下のようなものである。

- (1) 地震時における流量解析により、上水道配水管路網が破損を受けた場合の機能低下による需要者の受ける影響度を定義した。
- (2) 地震時流量解析により得られた影響度と人口分布、防災拠点の位置などを考慮し、管路網のネットワーク上における最適モニタリング位置を推定するために重要度を評価する手法を提案した。
- (3) 提案した手法を金沢市に適用し、地震時における上水道管路網の影響の大きさを求め、クリティカルポイントを明らかにした。さらに、人口、防災拠点（病院・特別消防区域・避難所）の位置を評価指標として、管路網の重要度評価を行い最適モニタリング位置を推定した。この結果、金沢市の地震時におけるクリティカルポイント、人口分布、重要施設、防災拠点の位置等の実状を反映した結果が得られた。
- (4) 推定された最適モニタリング位置は、機能低下の影響が最も大きいと考えられる下流域の管路および管路網がブロック化されている区域の上流側管路であった。

#### 参考文献

- 1) 金沢市企業局：上水道管路概要図，中日本コンサルタント，1995.
- 2) 金沢市企業局：金沢の水道，1993.
- 3) 高桑哲男：配水管網の解析と設計，森北出版，1978.
- 4) 金沢市都市政策部情報統計課：金沢市の人口及び世帯数，1997.
- 5) 国土庁防災マニュアルホームページ  
<http://www.nla.go.jp/bousai/manual/index.htm>
- 6) 久保慶三郎・片山恒雄：地下埋設水道管の被害予測，川崎市の震災予測に関する調査報告書，1975.
- 7) 金沢市：金沢市地域防災計画，震災対策編，総論，1998.
- 8) 建設省北陸地方建設局北陸技術事務所：石川県平野部の地盤図集，北陸建設弘済会，1982.



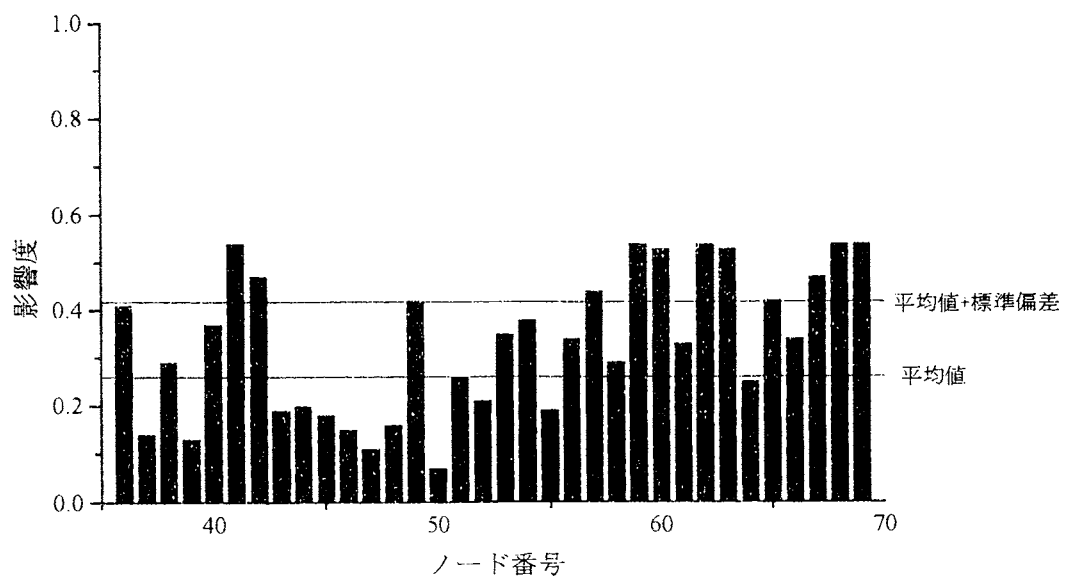
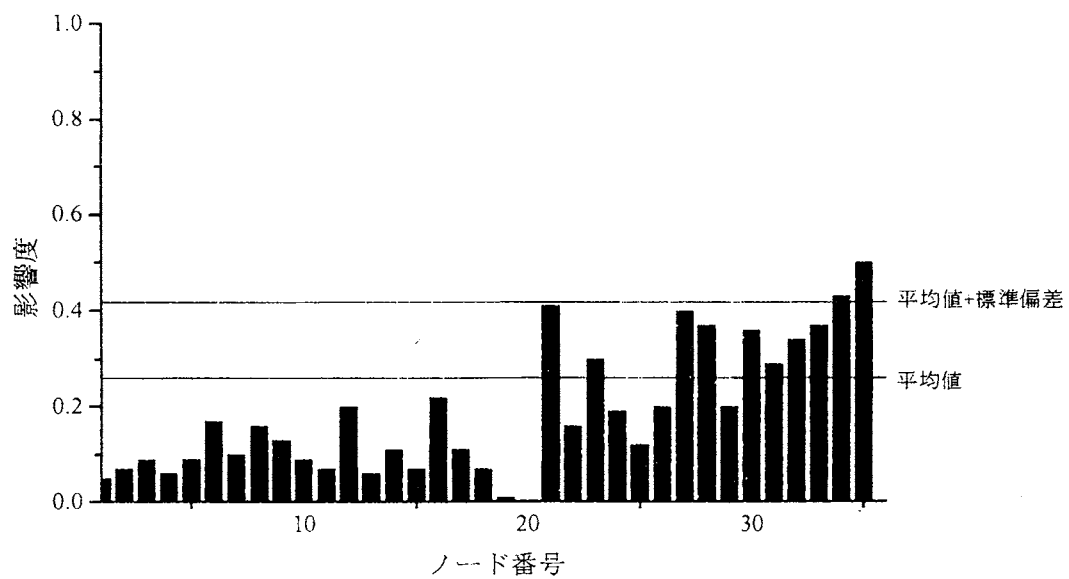
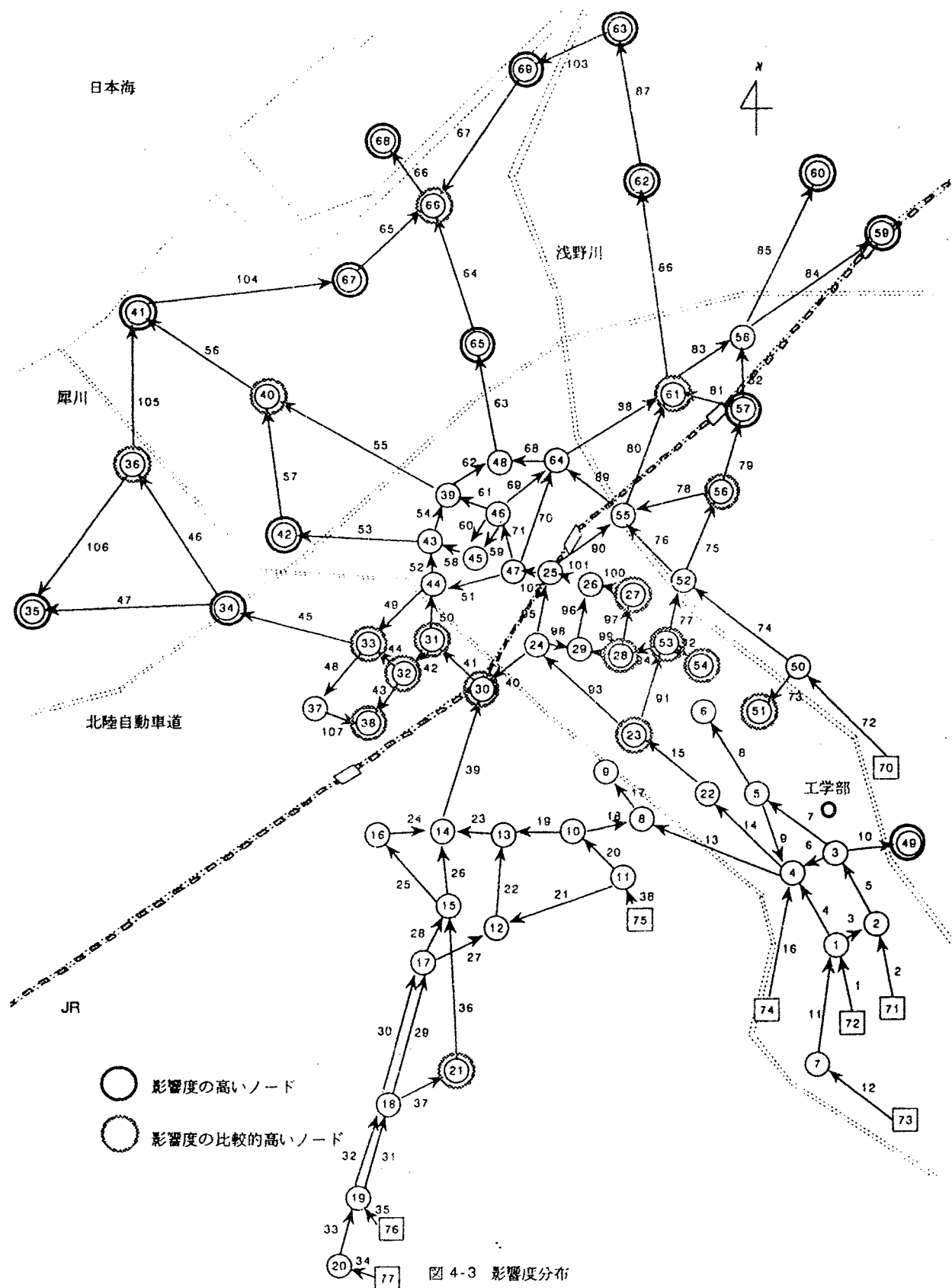


図 4-2 影響度



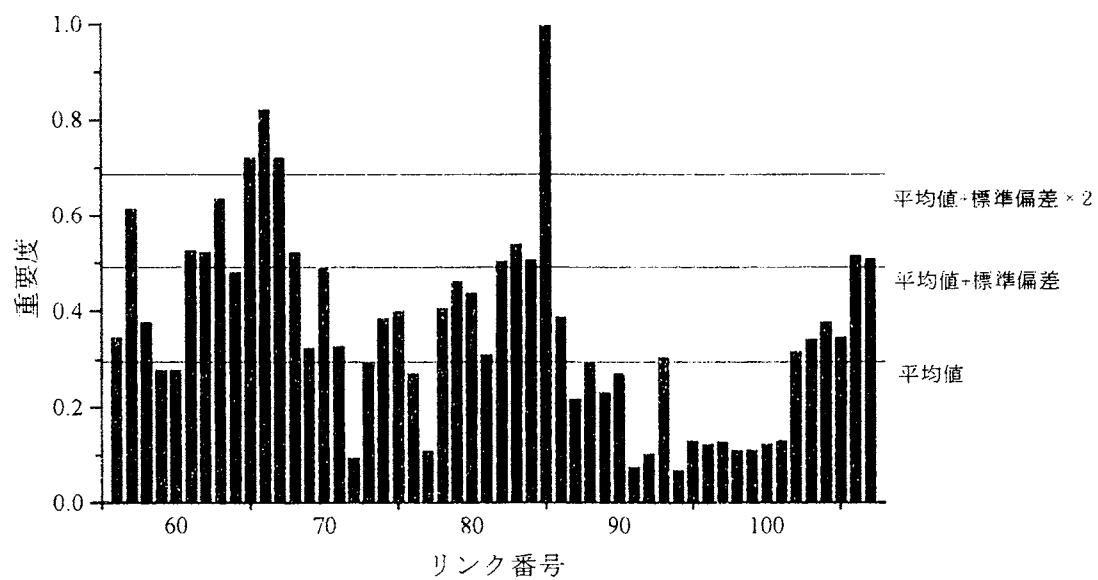
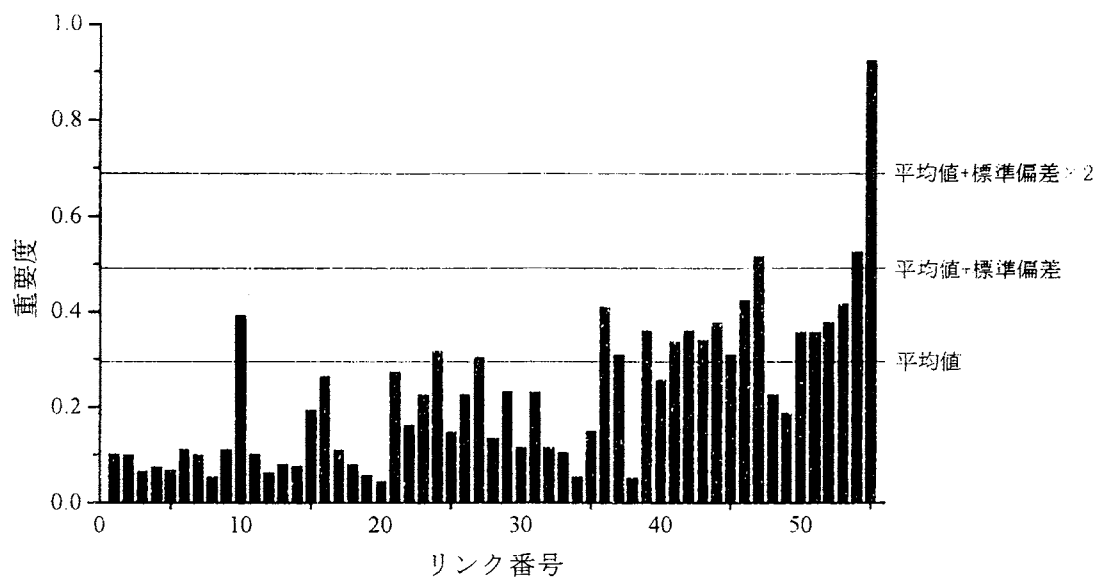
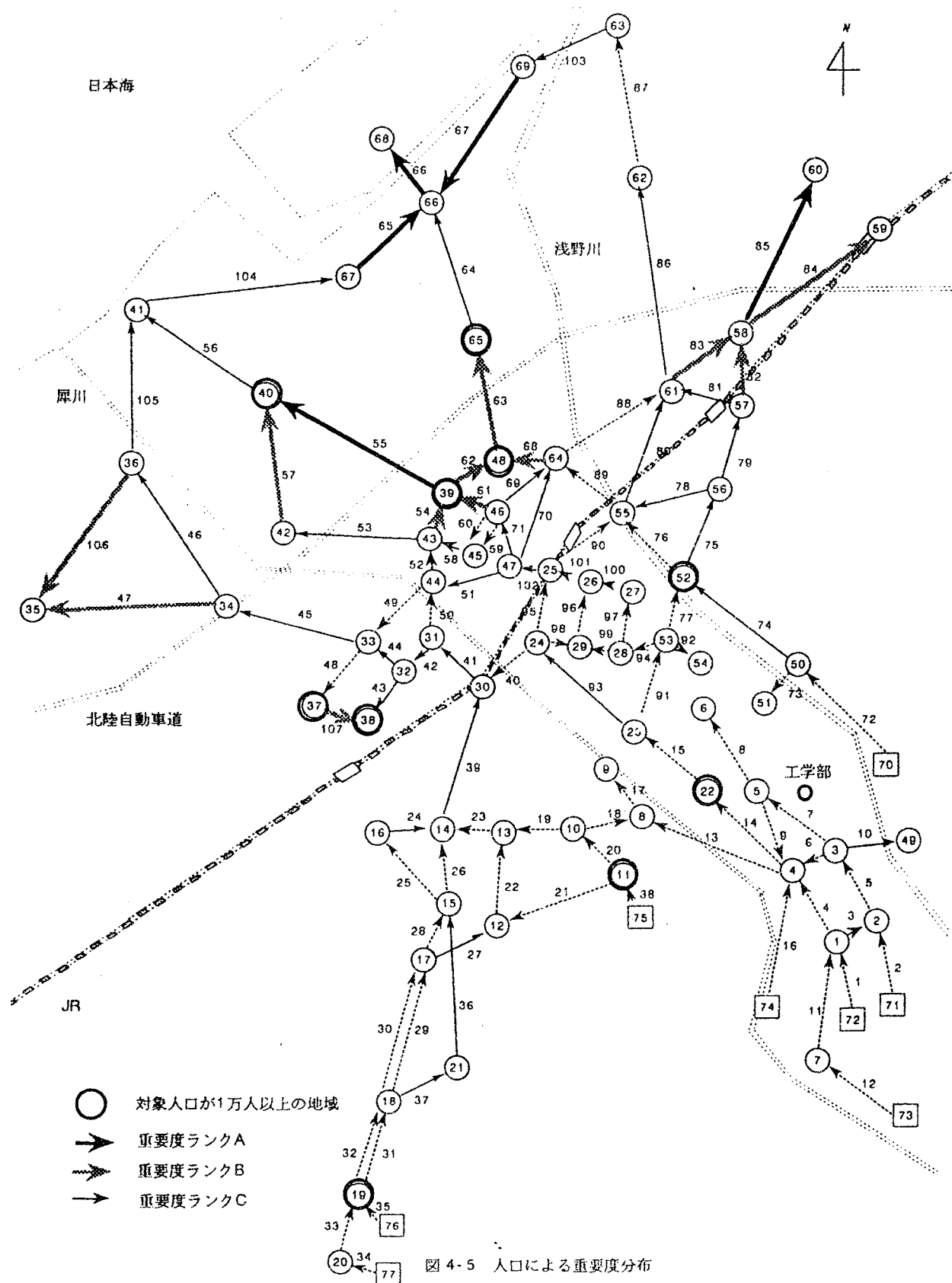


図 4-4 人口による重要度



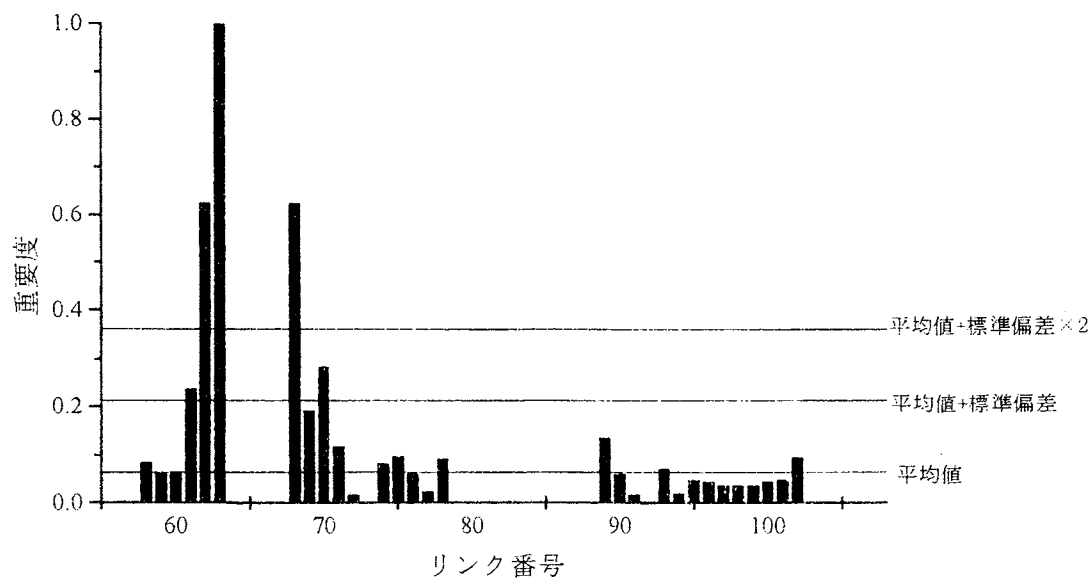
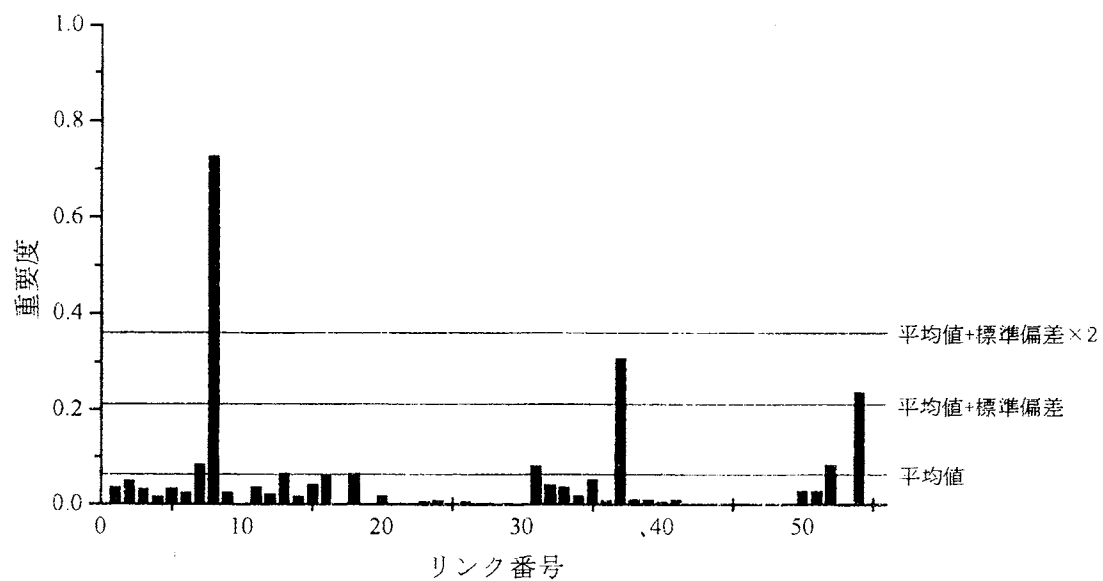
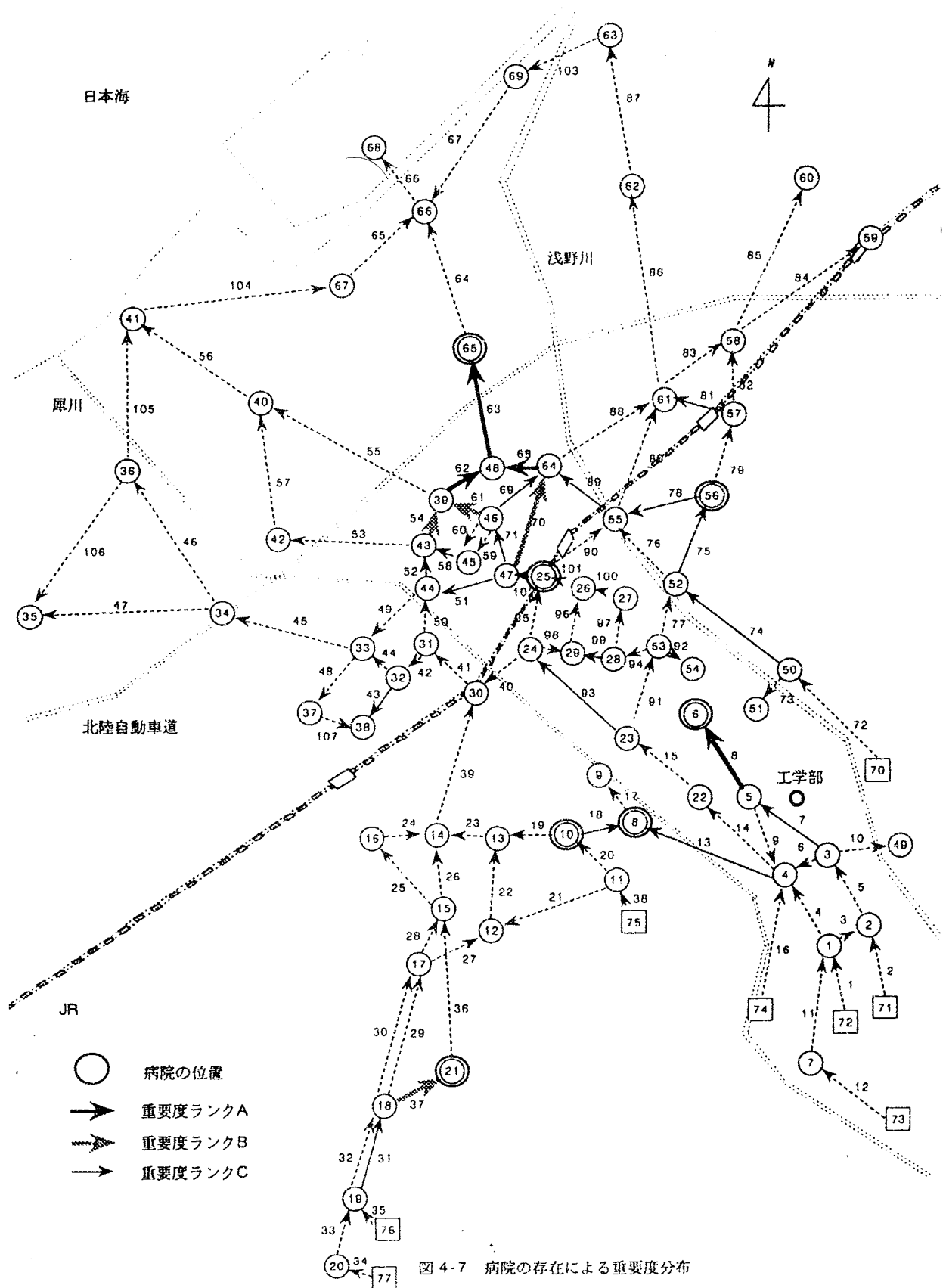


図 4-6 病院の存在による重要度





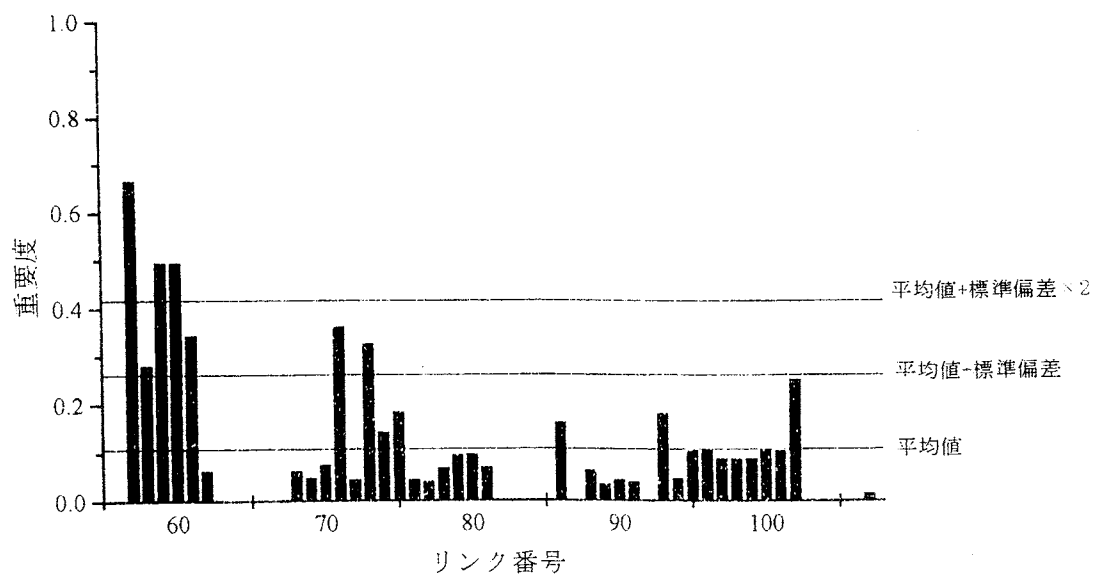
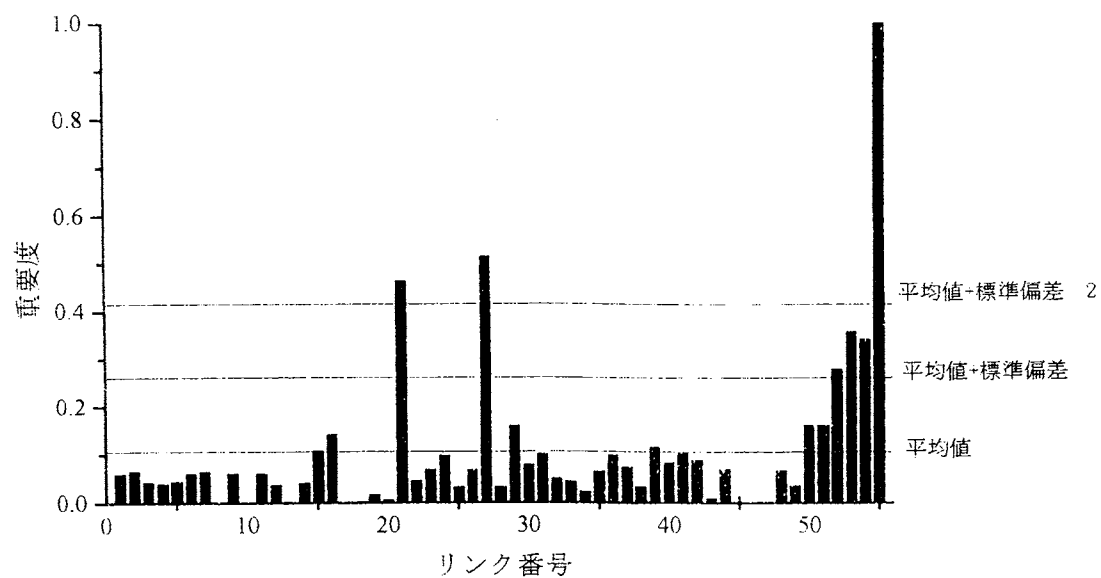
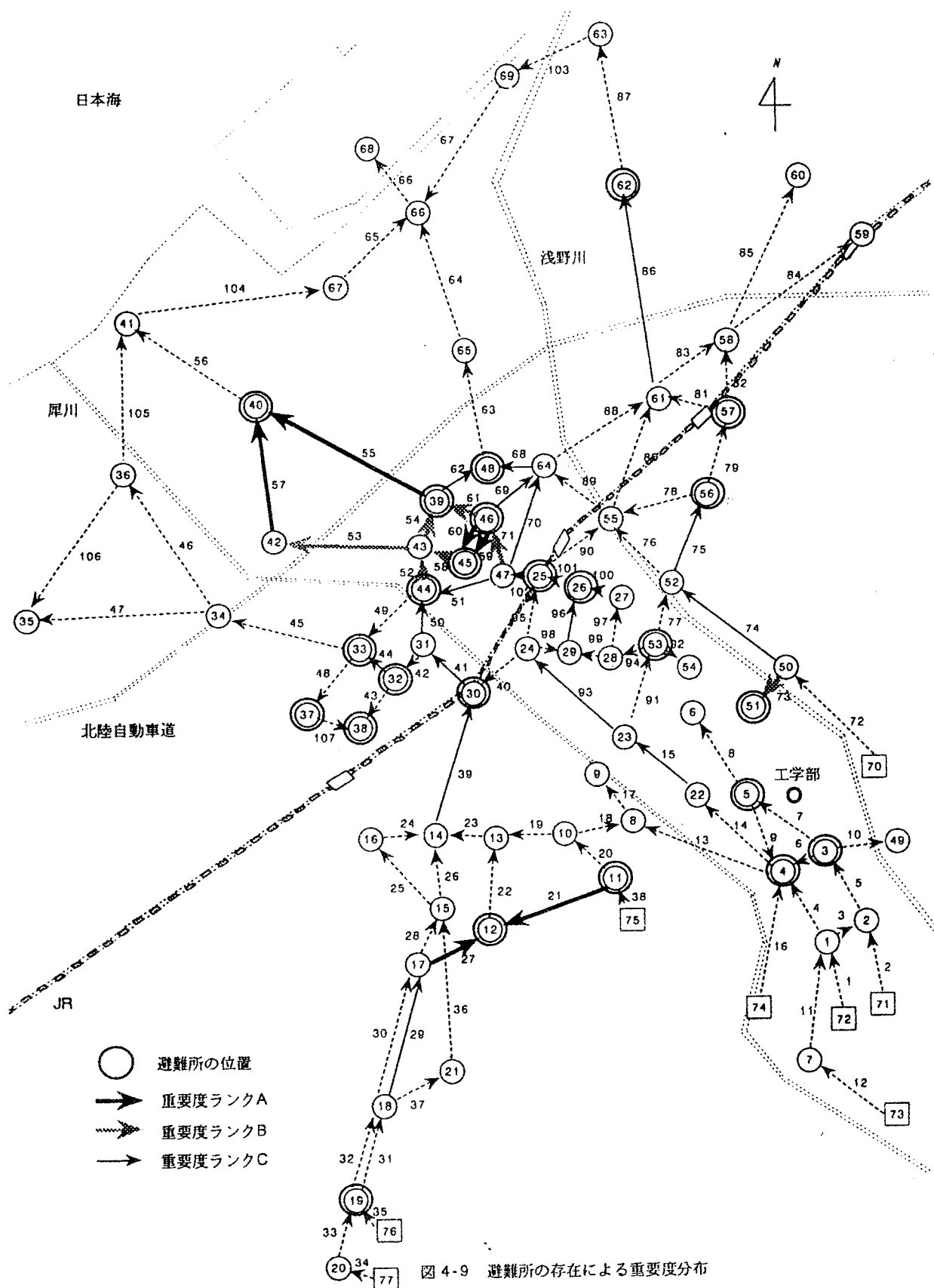


図 4-8 避難所の存在による重要度



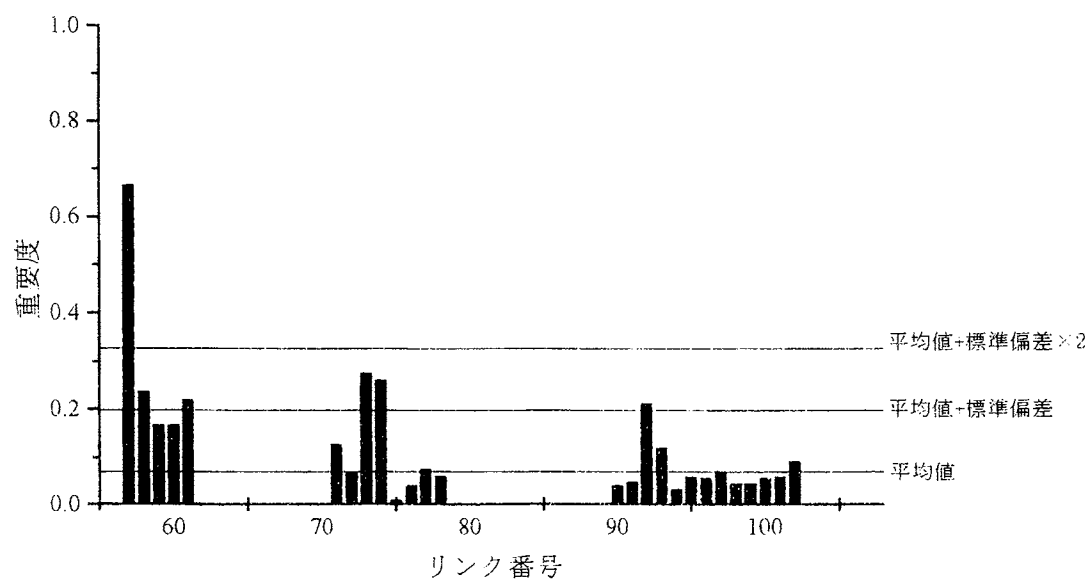
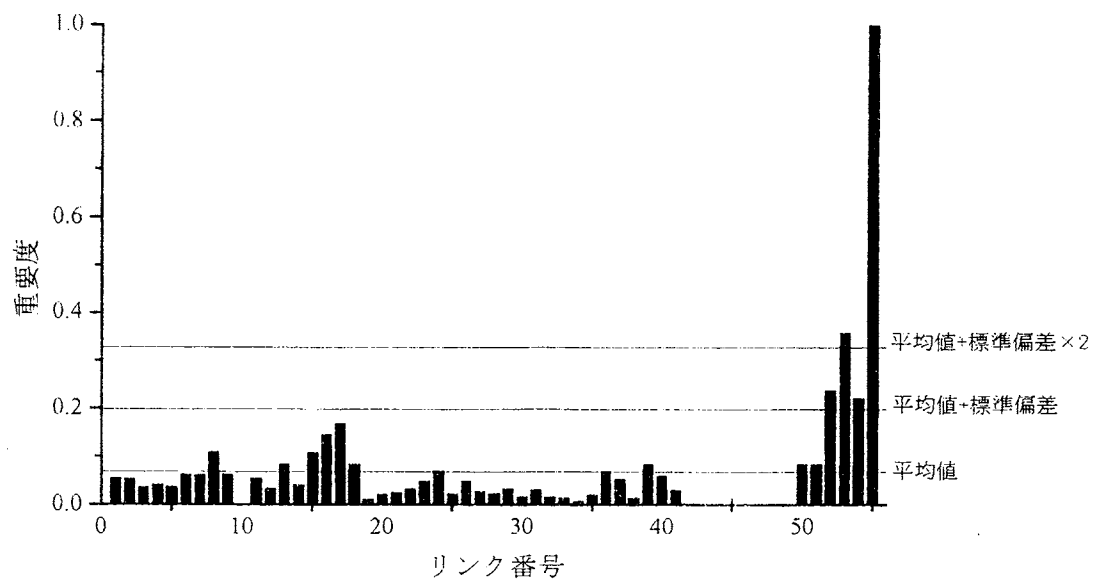
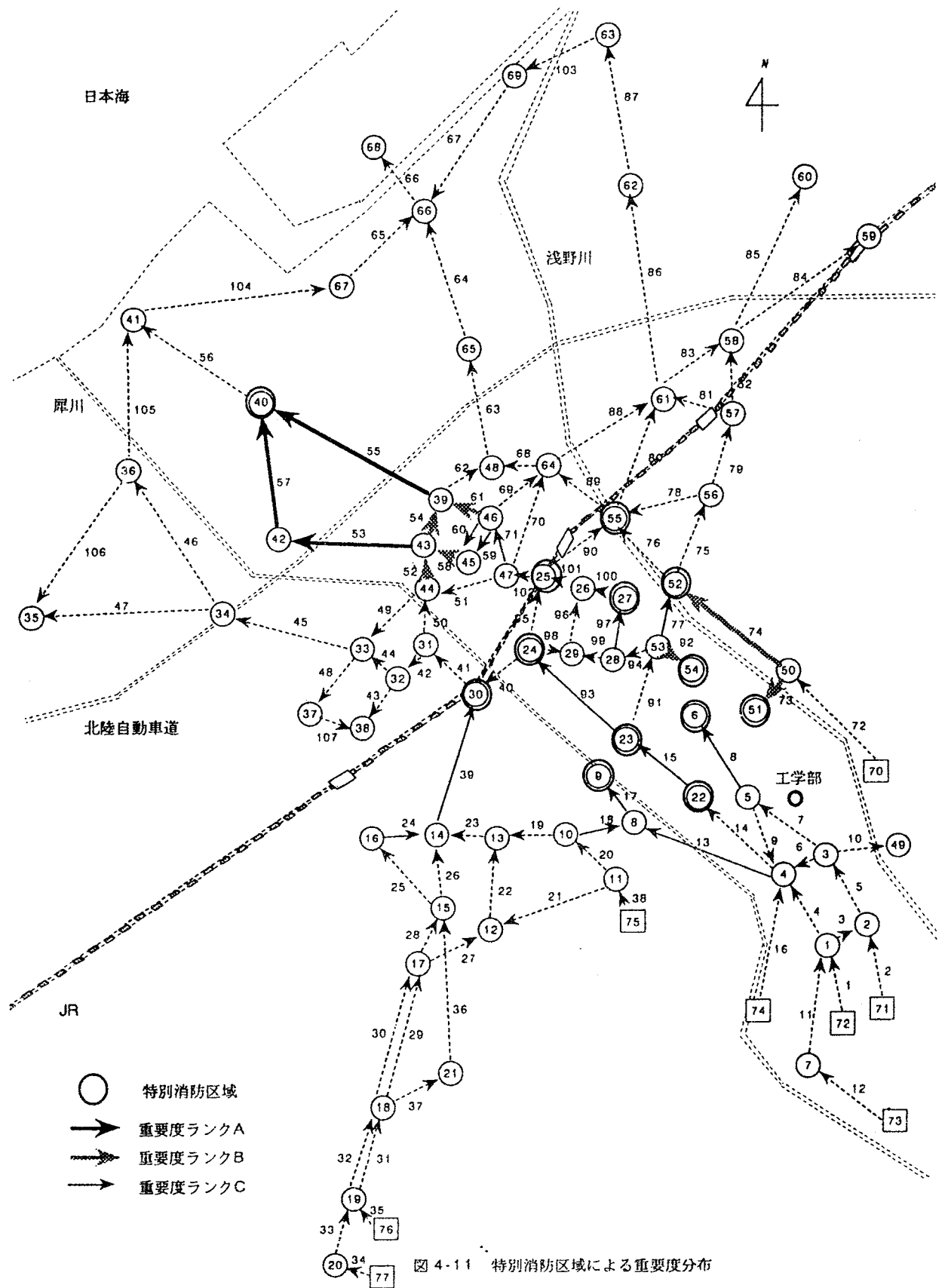


図 4-10 特別消防区域の存在による重要度



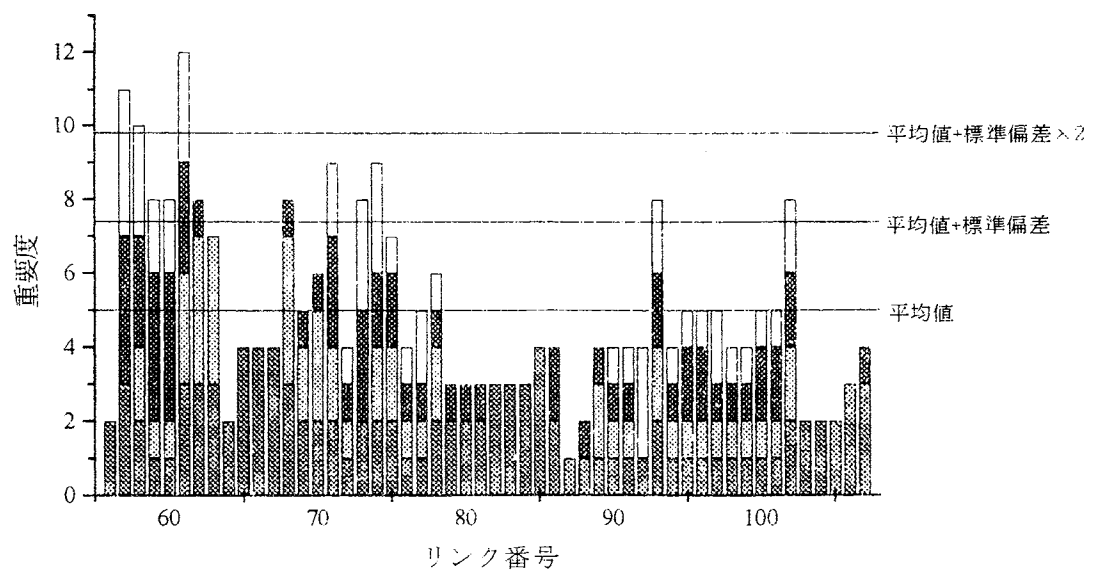
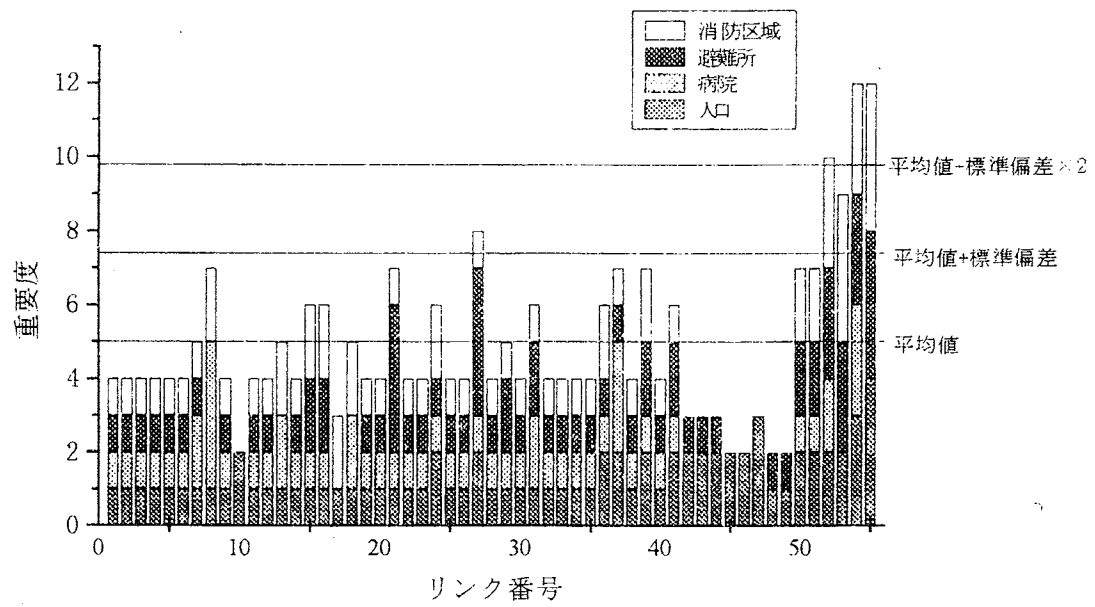
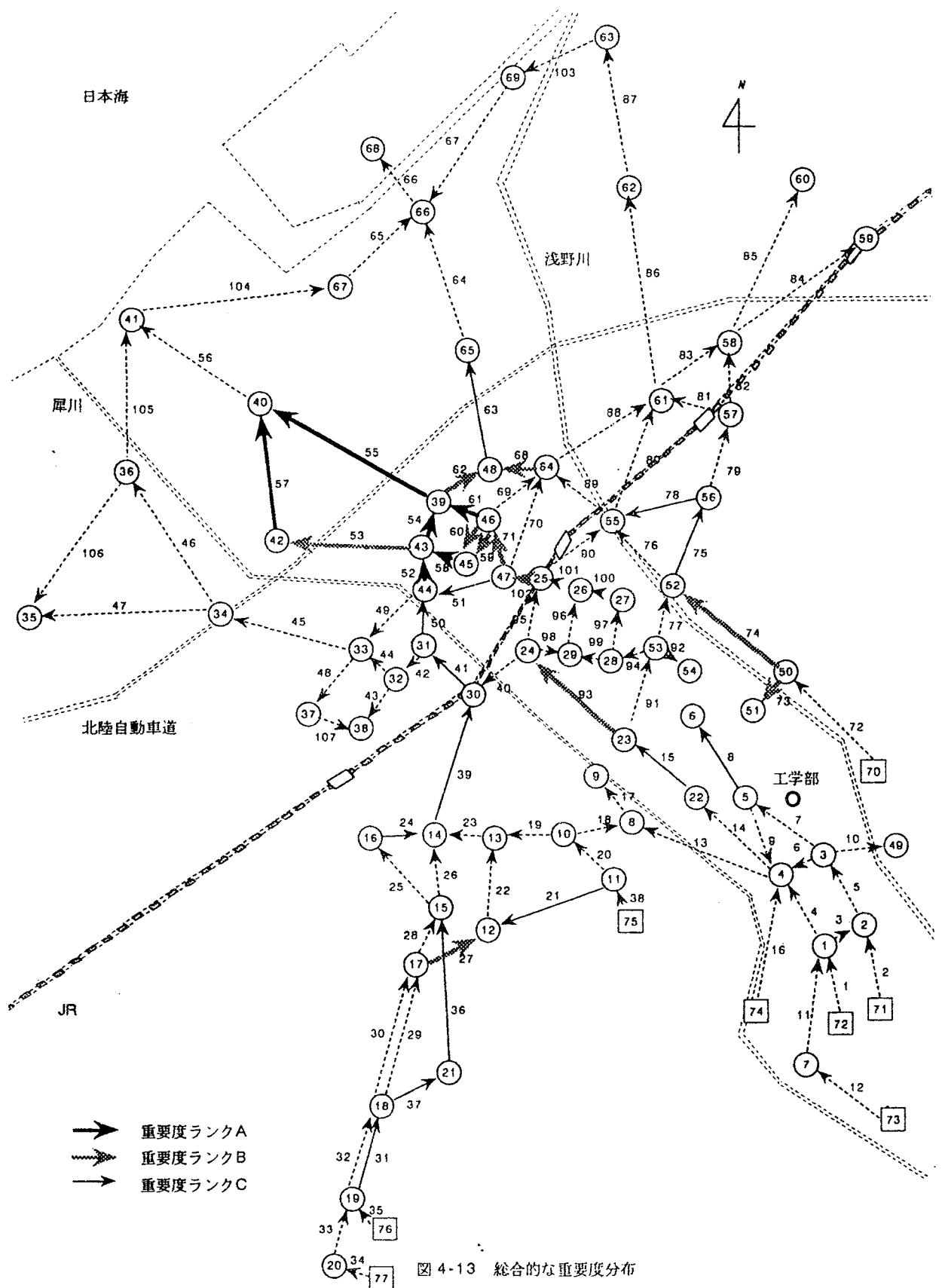


図 4-12 総合的な重要度



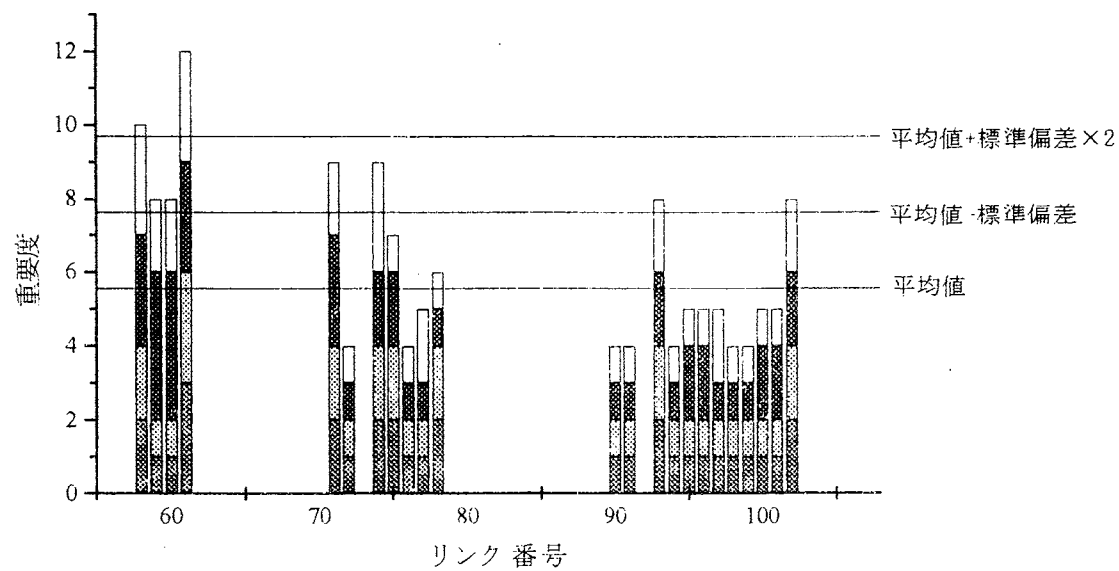
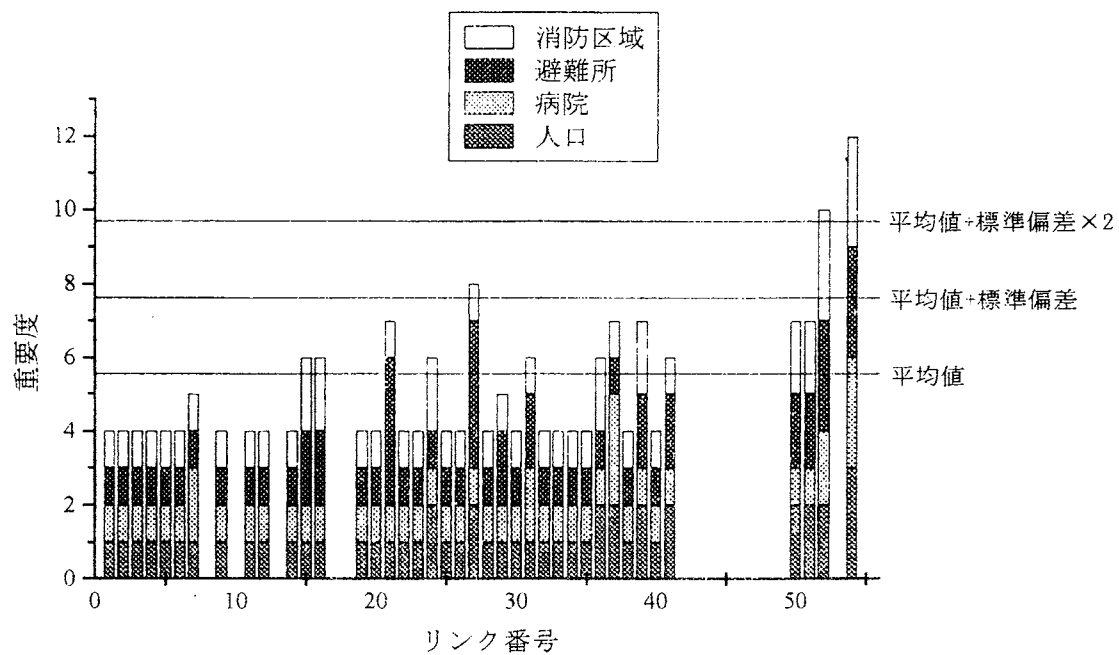


図 4-14 4指標全てを対象とした重要度

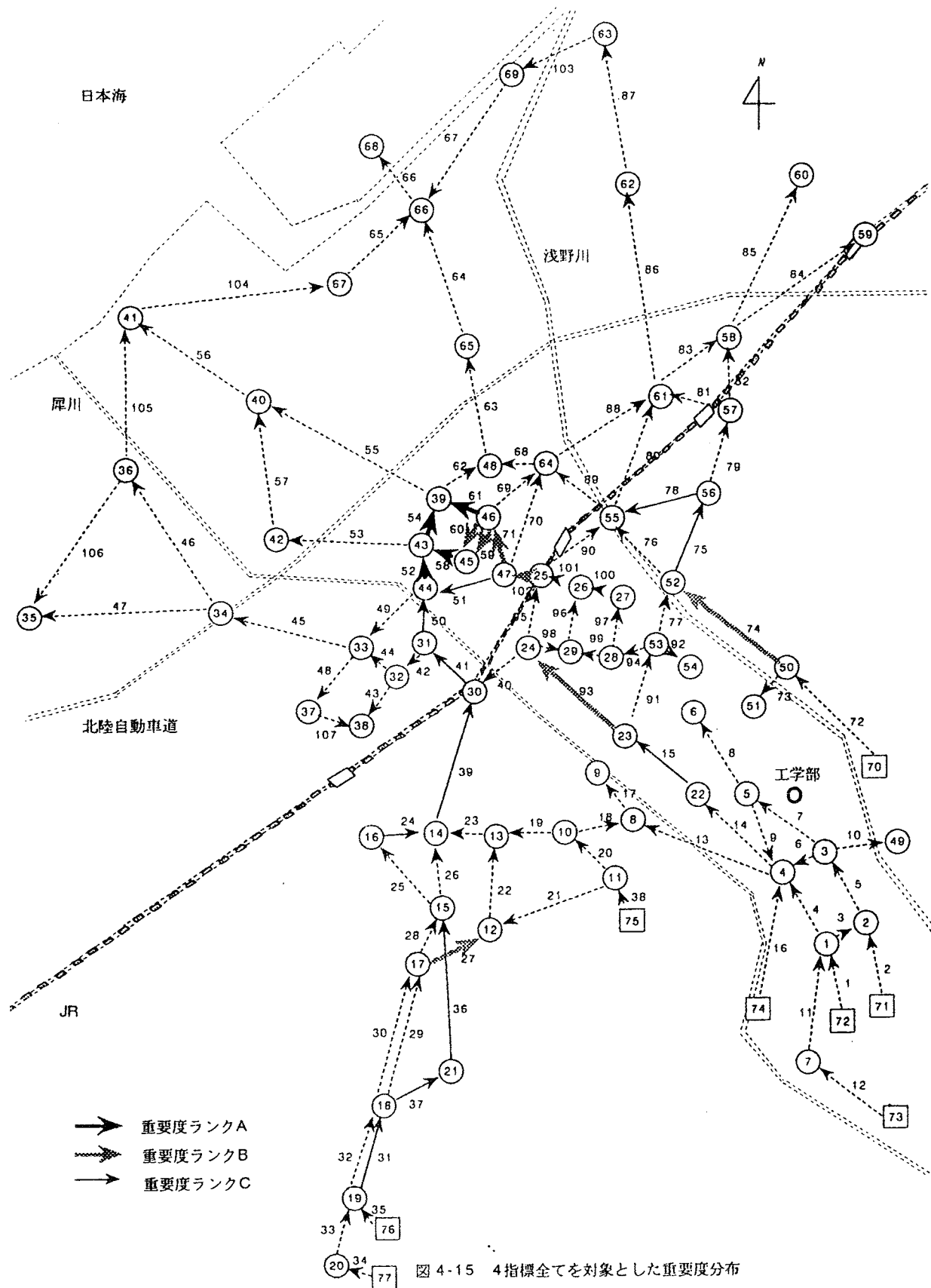




表 4-1 評価指標

評価指標	$x_{ij}$	評価指標値（単位）
飲料水	$x_{i1}$	人口（人）
	$x_{i2}$	避難所面積（ha）
医療用水	$x_{i3}$	病院の病床数（部屋）
消火用水	$x_{i4}$	特別消防区域での世帯数（戸）

表 4-2 ランク分けのマトリクス表示

重要度ランク	$r_{kj}$
ランク A	4
ランク B	3
ランク C	2
ランク D	1
ランク E	0

表 4-3 ノード条件 (その 1)

ノード	地盤高 (m)	管中心高 (m)	人口 (人)	需要水量 (m <sup>3</sup> /sec)	許容取り出し水量 (m <sup>3</sup> /sec)	1人1日3L水量 (m <sup>3</sup> /sec)
1	80.0	78.0	3,004	1.547E-02	1.879E-02	1.043E-04
2	80.0	78.0	1,713	8.822E-03	1.072E-02	5.948E-05
3	76.0	74.0	3,228	1.663E-02	2.019E-02	1.121E-04
4	60.0	58.0	9,567	4.927E-02	5.984E-02	3.322E-04
5	69.0	67.0	3,179	1.637E-02	1.989E-02	1.104E-04
6	57.0	55.0	4,037	2.079E-02	2.525E-02	1.402E-04
7	105.0	103.0	3,674	1.892E-02	2.298E-02	1.276E-04
8	46.0	44.0	4,703	2.422E-02	2.942E-02	1.633E-04
9	43.0	41.0	9,833	5.064E-02	6.151E-02	3.414E-04
10	40.0	38.0	4,987	2.568E-02	3.119E-02	1.732E-04
11	52.0	50.0	16,091	8.287E-02	1.007E-01	5.587E-04
12	21.0	19.0	10,242	5.275E-02	6.406E-02	3.556E-04
13	17.0	15.0	4,341	2.236E-02	2.715E-02	1.507E-04
14	13.0	11.0	6,113	3.148E-02	3.824E-02	2.123E-04
15	16.0	14.0	7,004	3.607E-02	4.381E-02	2.432E-04
16	13.0	11.0	8,020	4.131E-02	5.017E-02	2.785E-04
17	19.0	17.0	957	4.929E-03	5.986E-03	3.323E-05
18	27.0	25.0	8,570	4.414E-02	5.361E-02	2.976E-04
19	35.5	33.5	12,949	6.669E-02	8.100E-02	4.496E-04
20	42.0	40.0	7,781	4.007E-02	4.867E-02	2.702E-04
21	30.0	28.0	2,153	1.109E-02	1.347E-02	7.476E-05
22	35.0	33.0	10,199	5.253E-02	6.380E-02	3.541E-04
23	23.0	21.0	7,577	3.902E-02	4.740E-02	2.631E-04
24	13.0	11.0	3,562	1.835E-02	2.228E-02	1.237E-04
25	10.0	8.0	4,167	2.146E-02	2.607E-02	1.447E-04
26	12.5	10.5	3,001	1.546E-02	1.877E-02	1.042E-04
27	17.0	15.0	5,991	3.086E-02	3.747E-02	2.080E-04
28	22.0	20.0	1,279	6.587E-03	8.000E-03	4.441E-05
29	15.0	13.0	2,577	1.327E-02	1.612E-02	8.948E-05
30	15.5	13.5	8,559	4.408E-02	5.354E-02	2.972E-04
31	9.0	7.0	2,810	1.447E-02	1.758E-02	9.757E-05
32	9.0	7.0	2,339	1.205E-02	1.463E-02	8.122E-05
33	9.0	7.0	7,635	3.932E-02	4.776E-02	2.651E-04
34	5.0	3.0	2,343	1.207E-02	1.466E-02	8.135E-05
35	4.0	2.0	7,327	3.774E-02	4.583E-02	2.544E-04
36	2.0	0.0	2,104	1.084E-02	1.316E-02	7.306E-05
37	7.0	5.0	12,978	6.684E-02	8.118E-02	4.506E-04
38	8.0	6.0	12,178	6.272E-02	7.617E-02	4.229E-04
39	6.0	4.0	16,168	8.327E-02	1.011E-01	5.614E-04
40	3.0	1.0	15,345	7.903E-02	9.598E-02	5.328E-04

表 4-3 ノード条件 (その2)

ノード	地盤高 (m)	管中心高 (m)	人口 (人)	需要水量 (m <sup>3</sup> /sec)	許容取り出し水量 (m <sup>3</sup> /sec)	1人1日3L水量 (m <sup>3</sup> /sec)
41	5.0	3.0	1,940	9.991E-03	1.214E-02	6.736E-05
42	5.0	3.0	1,979	1.019E-02	1.238E-02	6.872E-05
43	7.0	5.0	1,125	5.794E-03	7.037E-03	3.906E-05
44	8.0	6.0	5,900	3.039E-02	3.691E-02	2.049E-04
45	7.0	5.0	1,116	5.748E-03	6.981E-03	3.875E-05
46	7.0	5.0	5,774	2.974E-02	3.612E-02	2.005E-04
47	8.0	6.0	2,240	1.154E-02	1.401E-02	7.778E-05
48	4.5	2.5	10,852	5.589E-02	6.788E-02	3.768E-04
49	22.0	20.0	4,605	2.372E-02	2.881E-02	1.599E-04
50	20.0	18.0	5,909	3.043E-02	3.696E-02	2.052E-04
51	22.0	20.0	8,576	4.417E-02	5.364E-02	2.978E-04
52	15.0	13.0	11,842	6.099E-02	7.407E-02	4.112E-04
53	25.0	23.0	1,947	1.003E-02	1.218E-02	6.760E-05
54	25.0	23.0	3,876	1.996E-02	2.425E-02	1.346E-04
55	8.5	6.5	3,076	1.584E-02	1.924E-02	1.068E-04
56	12.0	10.0	4,689	2.415E-02	2.933E-02	1.628E-04
57	9.5	7.5	9,172	4.724E-02	5.737E-02	3.185E-04
58	5.0	3.0	8,451	4.353E-02	5.286E-02	2.934E-04
59	4.0	2.0	3,336	1.718E-02	2.087E-02	1.158E-04
60	4.0	2.0	6,566	3.382E-02	4.107E-02	2.280E-04
61	8.5	6.5	1,324	6.819E-03	8.282E-03	4.597E-05
62	3.5	1.5	5,621	2.895E-02	3.516E-02	1.952E-04
63	2.5	0.5	79	4.070E-04	4.940E-04	2.740E-06
64	7.5	5.5	2,263	1.166E-02	1.416E-02	7.858E-05
65	3.0	1.0	10,063	5.183E-02	6.295E-02	3.494E-04
66	1.5	-0.5	2,181	1.123E-02	1.364E-02	7.573E-05
67	1.0	-1.0	1,103	5.681E-03	6.899E-03	3.830E-05
68	5.0	3.0	8,115	4.179E-02	5.076E-02	2.818E-04
69	2.0	0.0	591	3.044E-03	3.697E-03	2.052E-05
70	62.0	60.0	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
71	130.0	128.0	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
72	105.0	103.0	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
73	125.0	123.0	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
74	85.0	83.0	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
75	75.0	73.0	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
76	80.0	78.0	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
77	80.0	78.0	0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
合計			394,596	2.032E+00	2.468E+00	1.370E-02

表 4-4 配水場の H.W.L、L.W.L

ノード番号	配 水 場 名	H.W.L	L.W.L	エネルギー位
70	若 松	71.70	67.00	69.350
71	館 山	129.10	125.10	127.100
72	大 桑	106.95	102.55	104.750
73	浅 野 川	125.00	121.00	123.000
74	犀 川	83.60	78.10	80.850
75	野 田	66.45	62.60	64.525
76	四十万高区	91.60	87.30	89.450
77	四 十 万 中	66.45	60.45	63.450

表 4-5 リンク条件 (その 1)

リンク 番号	上流側 ノード	下流側 ノード	管路長 (m)	管径 (mm)	リンク 番号	上流側 ノード	下流側 ノード	管路長 (m)	管径 (mm)
1	72	1	650.0	350	26	15	14	1,150.0	450
2	71	2	1,050.0	350	27	17	12	712.5	600
3	1	2	575.0	450	28	17	15	600.0	1650
4	1	4	1,150.0	450	29	18	17	1,350.0	400
5	2	3	1,000.0	450	30	18	17	1,350.0	1650
6	3	4	625.0	350	31	19	18	1,300.0	400
7	3	5	1,000.0	300	32	19	18	1,300.0	1650
8	5	6	950.0	300	33	20	19	425.0	1650
9	5	4	1,100.0	350	34	77	20	475.0	1650
10	3	49	1,875.0	300	35	76	19	400.0	400
11	7	1	1,050.0	350	36	15	21	1,375.0	350
12	73	7	750.0	900	37	18	21	1,262.5	350
13	4	8	2,825.0	350	38	75	11	650.0	1000
14	4	22	1,025.0	1000	39	14	30	1,675.0	900
15	22	23	1,025.0	1000	40	33	34	2,375.0	600
16	74	4	1,550.0	1000	41	30	31	1000.0	0.70
17	8	9	675.0	300	42	31	32	400.0	0.60
18	10	8	1,000.0	350	43	32	38	825.0	0.40
19	10	13	550.0	900	44	32	33	675.0	0.60
20	11	10	875.0	1000	45	33	34	2375.0	0.60
21	11	12	2,750.0	600	46	34	36	1625.0	0.30
22	12	13	1,700.0	600	47	34	35	1950.0	0.35
23	13	14	725.0	900	48	33	37	1475.0	1.20
24	16	14	525.0	900	49	44	33	1100.0	1.20
25	15	16	1,550.0	1650	50	31	44	1012.5	0.60

表 4-5 リンク条件 (その 2)

リンク 番号	上流側 ノード	下流側 ノード	管路長 (m)	管径 (mm)	リンク 番号	上流側 ノード	下流側 ノード	管路長 (m)	管径 (mm)
51	47	44	1225.0	0.90	81	57	61	1,350.0	0.3
52	44	43	450.0	0.60	82	57	58	1,150.0	0.4
53	43	42	2587.5	0.45	83	61	58	1,700.0	0.35
54	43	39	775.0	0.60	84	58	59	3,850.0	0.3
55	39	40	2500.0	0.35	85	58	60	3,325.0	0.35
56	40	41	1712.5	0.35	86	61	62	2,625.0	0.35
57	42	40	1775.0	0.45	87	62	63	2,575.0	0.3
58	45	43	287.5	0.45	88	64	61	1,800.0	0.6
59	46	45	525.0	0.60	89	55	64	1,000.0	0.45
60	46	45	312.5	1.00	90	25	55	1,425.0	0.5
61	46	39	525.0	0.50	91	23	53	700.0	0.6
62	39	48	1350.0	0.60	92	53	54	450.0	0.3
63	48	65	1675.0	0.40	93	23	24	1,575.0	1
64	65	66	2025.0	0.40	94	53	28	700.0	0.5
65	67	66	1500.0	0.30	95	24	25	925.0	0.50
66	66	68	1350.0	0.40	96	29	26	850.0	0.30
67	69	66	2100.0	0.30	97	28	27	875.0	0.30
68	64	48	700.0	0.60	98	24	29	275.0	0.30
69	46	64	1375.0	0.50	99	28	29	500.0	0.40
70	47	64	1225.0	0.35	100	27	26	525.0	0.35
71	47	46	312.5	0.50	101	26	25	300.0	0.35
72	70	50	1825.0	0.90	102	25	47	300.0	0.50
73	50	51	400.0	0.40	103	63	69	1225.0	0.25
74	50	52	1700.0	0.90	104	41	67	2150.0	0.25
75	52	56	1525.0	0.60	105	36	41	1700.0	0.25
76	52	55	1225.0	0.45	106	36	35	1875.0	0.25
77	53	52	1450.0	0.45	107	37	38	450.0	0.25
78	56	55	1225.0	0.30					
79	56	57	1300.0	0.60					
80	55	61	1425.0	0.35					

表 4-6 病院別病床数

病 院 名	所 在 地	病 床 数
国 立 金 沢 病 院	石 引	765
金 沢 大 学 医 学 部 付 属 病 院	宝 町	792
石 川 県 中 央 病 院	南 新 保 町	660
金 沢 市 立 病 院	平 和 町	360
金 沢 赤 十 字 病 院	三 馬	300
済 生 会 石 川 総 合 病 院	本 町	260
鳴 和 総 合 病 院	大 樋 町	250
国 家 公 務 員 共 済 組 合 北 陸 病 院	泉 ケ 丘	150
計		3,537

表 4-7 指定避難所

避難地名	面積 (ha)	所在地
上荒屋第一児童公園	0.1	上荒屋
米丸中央公園	1.1	高畠
玉鉾公園	1.2	玉鉾
東力あすなろの森公園	0.8	東力
金沢南総合運動公園	8.0	富樫
平和町公園	0.9	平和町
西南部中学校	2.0	新保本町
三口新町第一児童公園	0.3	三口新町
三口新町第二児童公園	0.4	三口新町
三口新町第三児童公園	0.2	三口新町
金大工学部グラウンド	7.0	小立野2丁目
美術工芸大学	4.7	小立野5丁目
保健センター	1.3	小立野1丁目
兼六中学校	2.6	田井町
鳴和中学校	3.2	鳴和
中央卸売市場	9.1	西念町
長田中学校	4.0	長田町
金沢市立工業高校	3.5	畝田東町
金石中学校	2.5	金石
浅野川中学校	1.5	諸江町
栗崎第一公園	1.3	栗崎町
栗崎中学校	2.0	栗崎町
木越中央公園	0.7	木越団地
木越運動公園	0.4	木越団地
玉川公園	1.5	玉川町
城北中央公園	1.0	小坂町
駅前広場	2.0	駅前
長坂みはらし公園	0.8	長坂
光が丘公園	0.5	光が丘
額せせらぎ公園	0.8	額谷
神田交通公園	0.9	神田

表 4-8 特別消防区域世帯数

特 別 消 防 対 策 区 域 名 称	世 帯 数
増 泉 1 丁 目	339
野 町 2 丁 目	358
野 町 1 丁 目	51
寺 町 4 丁 目	166
寺 町	205
菊 川 2 丁 目	176
石 引 2 丁 目 (1)	108
石 引 2 丁 目 (2)	123
石 引 3 丁 目 (3)	82
扇 町	174
横 山 町、 暁 町	271
材 木 町	172
中 央 通 町	311
長 土 堀 2、3 丁 目	255
堀 川 町	408
瓢 單 町	194
瓢 單 町、 笠 市 町	238
尾 張 町 2 丁 目	33
東 山 1 丁 目	679
東 山 2 丁 目	425
山 の 上 町	250
森 山 1 丁 目	551
東 山 3 丁 目	290
小 橋 町	209
昌 永 町	140
金 石 西 1 丁 目	267
金 石 西 2 丁 目	182
金 石 西 3 丁 目	88
金 石 西 4 丁 目 (1)	134
金 石 西 4 丁 目 (2)	143



表 4-9 ノードにおける評価指標値 (その1)

ノード番号	対象地域	人口	病床数	避難所面積 (ha)	特別消防 区世帯数
1	涌波	3,004	0	0	0
2	土清水	1,713	0	0	0
3	小立野1,2丁目	3,228	0	8.3	0
4	三口新町、平和町、十一屋町	9,567	0	1.8	0
5	小立野3,4,5丁目	3,179	0	4.7	0
6	石引、宝町	4,037	1,557	0	313
7	末町	3,674	0	0	0
8	泉野	4,703	360	0	0
9	寺町、野町、法島町	9,833	0	0	575
10	弥生、泉ヶ丘	4,987	150	0	0
11	緑が丘、泉野出町、長坂台、 富樫、円光寺、山科	16,091	0	0.8	0
12	窪、伏見台、有松1,2丁目、寺地	10,242	0	8	0
13	有松3,4,5丁目、泉	4,341	0	0	0
14	西泉、泉本町	6,113	0	0	0
15	横川、久安3,4,5,6丁目	7,004	0	0	0
16	米泉町、押野	8,020	0	0	0
17	久安1,2丁目	957	0	0	0
18	馬替、高尾	8,570	0	0	0
19	額谷、額新町、大額、光が丘、額新保	12,949	0	1.3	0
20	四十万、三十刈	7,781	0	0	0
21	三馬	2,153	300	0	0
22	菊川、城南、笠舞	10,199	0	0	176
23	本多町、幸町、新堅、十三間町、 片町、中央通町	7,577	0	0	516
24	三社、長土堀	3,562	0	0	255
25	昭和町、本町、堀川、笠市、此花	4,167	260	2	624
26	芳斉、玉川	3,001	0	1.5	0
27	彦三町、十間町、安江、武蔵、 瓢箪、尾張	5,991	0	0	249
28	香林坊、高岡町、尾山町	1,279	0	0	0
29	長町	2,577	0	0	0
30	神田、増泉、御影町、中村、白菊、 千日町	8,559	0	0.9	339
31	新神田、本江町	2,810	0	0	0
32	東力	2,339	0	0.8	0
33	古府、松島、黒田、高畠、進和	7,635	0	1.1	0
34	豊穂、下安原、北塚、南塚、神野	2,343	0	0	0
35	みどり、打木、副増、上安原、中尾	7,327	0	0	0
36	専光寺、二ツ寺、赤十、佐奇森	2,104	0	0	0
37	西金沢、保古、八日市、矢木	12,978	0	2	0
38	八日市出町、新保本町、上荒屋	12,178	0	0.1	0
39	藤江北、南、松村、二ツ屋、畝田、 無量寺、若宮、二宮、北町	16,168	0	3.5	0

表 4-9 ノードにおける評価指標値 (その2)

ノード番号	対象地域	人口	病床数	避難所面積 (ha)	特別消防 区世帯数
40	金石、寺中、桂町、観音堂、善光寺	15,345	0	5.8	814
41	大野町	1,940	0	0	0
42	示野、松村7丁目、袋畠	1,979	0	0	0
43	桜田町、出雲	1,125	0	0	0
44	玉鉾、入江、米丸	5,900	0	1.2	0
45	長田本町、元菊	1,116	0	9.1	0
46	駅西本町、長田、広岡、二口町、 西念1丁目	5,774	0	4	0
47	中橋町、北安江1, 2, 3丁目	2,240	0	0	0
48	西念町、北安江町、諸江	10,852	0	1.5	0
49	旭町、田上	4,605	0	0	0
50	若松、鈴見	5,909	0	0	0
51	田井町、天神町、扇町、桜町、暁町	8,576	0	2.6	309
52	橋場、東山、森山、元町、小橋町、 山の上、小金町、春日町	11,842	0	0	2,404
53	兼六元町、小将町、大手町、広坂	1,947	0	0	0
54	横山町、東兼六町、材木町	3,876	0	0	308
55	京町、浅野本町1, 2丁目、昌永町	3,076	0	0	140
56	鳴和、神宮寺、乙丸	4,689	250	3.2	0
57	神谷内、三池町、小坂、疋田	9,172	0	1	0
58	福久、金市、荒屋、百坂、千木、 柳橋、法光寺、横枕	8,451	0	0	0
59	吉原町、弥勒町、塚崎、岩出、観法寺	3,336	0	0	0
60	大場町、八日町、才田町、北、南森本	6,566	0	0	0
61	田中町、高柳町、宮保町	1,324	0	0	0
62	木越町、大浦町、千田町、東蚊瓜	5,621	0	1.1	0
63	湊1丁目	79	0	0	0
64	浅野本町、沖町、磯部町、松寺町、 七ツ屋、三浦	2,263	0	0	0
65	南新保、間屋町、近岡、直江、 大友、割出、大河端、三口、三ツ谷	10,063	660	0	0
66	御供田、須崎、蚊瓜、北間	2,181	0	0	0
67	湊4丁目、戸水	1,103	0	0	0
68	栗崎	8,115	0	0	0
69	湊2丁目	591	0	0	0
70	若松配水場				
71	館山配水場				
72	大桑配水場				
73	浅川配水場				
74	犀川配水場				
75	野田配水場				
76	四十万高区配水場				
77	四十万中配水場				
合計		394,596	3,537	67.3	7,022

## 第5章 結 論

本研究は、ライフラインの地震被害早期把握のために、地盤挙動のモニタリングとライフラインのモニタリングを連動した、ハイブリッドモニタリングシステムの開発を目的とし、その基礎となる研究を行ったものである。まず、ライフラインの地震被害に大きな影響を与えている地盤の液状化を取り上げ、地震動のモニタリングによる液状化判定手法について検討した。全国各地で広範に展開されている強震観測記録を用いた液状化センサーの開発を目的とし、強震記録における振幅特性と振動数特性のそれぞれに注目して液状化判定指標を提案した。つぎに、液状化領域の空間分布推定に関する検討を行った。ライフラインの即時被害予測や復旧戦略の策定にあたっては、液状化領域の平面分布を知ることが重要であるが、液状化センサーを無数に配置することは不可能であるので、限られた情報から液状化領域の空間分布を推定する方法を提案した。さらに、ライフラインの最適モニタリング位置決定に関して検討を行った。地震時流量解析から管路網のクリティカルポイントを明らかにするとともに、防災拠点などを考慮した管路網の重要度を定義し、それらを用いた最適モニタリング位置の決定方法を提案した。さらに、金沢市における上水道管路網を対象にケーススタディを行った。

以上の研究により得られた成果をまとめると以下のようである。

- (1) 強震記録から液状化を検知する指標として、最大上下／水平比、フーリエスペクトル面積比、ランニングスペクトル体積比、平均卓越振動数と卓越振動数時間変化率の4つを定義し、これらを総合した液状化判定指標を提案した。液状化地盤と非液状化地盤における強震記録に適用したところ、比較的精度よく液状化地盤を判定することができた。すなわち、本研究で提案する液状化判定指標が2.0以上の場合、液状化が発生した可能性は高く、3.0以上の場合その可能性は非常に高いと判断される。
- (2) 地盤統計手法のひとつであるクリギング法を、液状化領域の空間分布推定に適用することを提案した。本手法を利用することで、対象地域の任意断面における液状化領域を、2次元または3次元的に評価することが可能であることを示した。なお、本研究ではボーリングデータを用いて液状化の予測を行ったが、対象地域におけるボーリングデータの密度が、その推定精度に大きく影響することを明らかにした。
- (3) 地震時流量解析により得られた影響度と人口分布、防災拠点の位置などを考慮し、管路網のネットワーク上における最適モニタリング位置を推定するために重要度を評価する手法を提案した。提案した手法を金沢市に適用し、地震時における上水道管路網の影響の大きさを求め、クリティカルポイントを明らかにした。さらに、人口分布、防災拠点（病院・特別消防区域・避難所）の位置を評価指標として、管路網の重要度評価を行い最適モニタリング位置を推定した。この結果、金沢市の地震時におけるクリティカルポイント、人口分布、重要施設、防災拠点の位置などの実状を反映した結果が得られた。

今後は、さらに多くの強震記録を収集しすることによって液状化判定手法の精度を検証

するとともに、観測点における地盤情報も考慮に入れた、さらに判定精度の高い手法に改良していく予定である。また、最適モニタリング位置の決定については、各評価指標間の関係をさらに整理するとともに、具体的なモニタリング手法と、モニタリング結果を用いた被害推定手法の開発に関する検討を進めていく必要がある。

最後に、本研究課題を卒業研究として取り組まれた金沢大学大学院1年の野津 智氏、学部4年の井口典明氏、菊川雅司氏に深謝します。また、報告書の取りまとめにご協力頂いた金沢大学地震防災研究室の学生諸氏にも感謝します。なお、本研究ではたくさんの強震記録を利用させて頂きました。強震記録を提供して頂きました、建設省土木研究所、運輸省港湾技術研究所、科学技術庁、(財)震災予防協会、関西地震観測協議会、神戸市開発局、JRを始めとする関係機関の各位に厚くお礼申し上げます。